

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

Zveřejněná podle §31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

2012-605

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

C03B 5/027

(2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLVÉHO
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **05.09.2012**

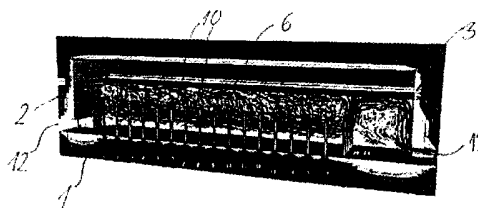
(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **01.10.2014**
(Věstník č. 40/2014)

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

(72) Původce:
Ing. Miroslav Polák, Jablonec nad Nisou, CZ
prof. Ing. Lubomír Němec, DrSc., Praha 1, CZ
Ing. Petra Cincibusová, Ph.D., Železný Brod, CZ
Ing. Marcela Jebavá, Ph.D., Odolena Voda, CZ
Ing. Jiří Brada, Vsetín, CZ
Ing. Miroslav Trochta, Valašské Meziříčí, CZ
doc. Ing. Jaroslav Kloužek, CSc., Senohraby, CZ

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

šířkou mezi protilehlými bočními stěnami (4).



(54) Název přihlášky vynálezu:

Způsob kontinuálního tavení skel řízenou konvekcí skloviny

(57) Anotace:

Zdroje energie působí v tavicím prostoru nejméně v jedné řadě v podélné ose tavicího prostoru, nebo paralelně s podélnou osou, a vyvolávají spirálovité proudění skloviny (6) s kruhovým pohybem napříč tavicí částí, které postupuje od čelní zakládací stěny (2) k příčné přehradní zdi (7) ve sklovině (6) případně příčné řadě (9) zdrojů energie. Příčný teplotní gradient každého spirálovitého proudění je vždy vyšší než jeho podélný teplotní gradient mezi příčnou přehradní zdi (7) ve sklovině (6), příčnou řadou (9) zdrojů energie a přivrácenou čelní zakládací stěnou (2). Poměr příčného teplotního gradientu ku podélnému teplotnímu gradientu je v rozmezí 1 až 30, s výhodou 5 až 20. Spirálovité proudění skloviny prochází tavicím prostorem, jehož využití pro rozpouštění částic, zejména sklářského písku, představuje 0,6 až 0,8 z celkového tavicího prostoru, vymezeného výškou skloviny (6), délkou mezi příčnou přehradní zdi (7) ve sklovině (6) případně příčnou řadou (9) zdrojů energie a přivrácenou zakládací stěnou (2) a

Způsob kontinuálního tavení skel řízenou konvekci skloviny

Oblast techniky

- 5 Vynález se týká způsobu kontinuálního tavení skel řízenou konvekci skloviny, při němž se působí na roztavené sklo, obsahující nerozpuštěné částice, zejména sklářského písku a nacházející se v horizontálně orientovaném a odděleném průtočném tavicím prostoru sklářské pece zdroji energie, jako jsou průmyslové sklářské hořáky, topné elektrody a jiné vhodné topné zdroje energie.

10

Dosavadní stav techniky

- Kontinuální tavení skel je způsob přípravy tradičního materiálu v masovém měřítku tavením spojený přímo se zpracováním vzniklé suroviny mnoha způsoby. Jeho základy sahají
15 do 19. století, kdy se vznikající sklářská technologie inspirovala jiným tavicím procesem, výrobou oceli. V souladu s tímto procesem vznikla první kontinuální sklářská zařízení nazvaná sklářské vany jako kryté horizontální prostory vyložené žárovzdornými materiály, do nichž se na vstupu vkládala sklářská vsázka, nejčastěji směs krystalických surovin s proměnným podílem sklářských střepů a na výstupu byla odebírána k vysokoteplotnímu
20 zpracování homogenní skelná tavenina. Zařízení byla ohřívána pomocí hořáků umístěných nad hladinou taveniny s topícím médiem plyn nebo olej. Jednalo se tedy o kompaktní, shora ohřívána jednodílná zařízení, která byla později rozdělena průtokem nebo zúžením na tavicí část, kde probíhaly a dokončovaly se sklotvorné – homogenizační procesy, a na pracovní část, kde se tavenina především teplotně homogenizovala pro zpracování. Průtok
25 taveniny těmito zařízeními byl v zásadě horizontální, avšak v důsledku přirozeně vzniklých rozdílů teplot dávkováním chladné vsázky na hladinu taveniny, typu a umístění otopu a různé úrovně ztrát tepla rozhraními se v tavicím i pracovním prostoru pece ustálilo vždy i přirozené cirkulační proudění, které po složení s průtočným prouděním vytvořilo poměrně složitý obraz proudění v pecním prostoru.
- 30 Později byly vyvinuty další typy sklářských tavicích prostorů ohřívání především elektricky a vyznačující se v podstatě vertikálním průtokem taveniny tavicím prostorem a s podobným složeným prouděním taveniny. Prostorů s převážně vertikálním průtokem se však tato přihláška vynálezu netýká.

Problém pro tavení nevyužitelných cirkulujících objemů taveniny dovolily upřesnit zkoušky tzv. přechodových charakteristik tavicích prostorů [1-3]. Při těchto zkouškách se na vstup tavicího zařízení vnášel indikátor, jehož indikační charakter se během tavicího procesu neměnil, a který byl identifikovatelný na výstupu ze zařízení. Nejčastějším indikátorem byly vhodné radioaktivní izotopy. Sledování charakteru závislosti indikátoru ve výsledném skle na 5 čase podávalo informace o charakteru proudění v tavicím zařízení. Pomohlo identifikovat i zmíněný prostor, v němž tavenina pouze cirkulovala. Zjišťovaný podíl takových prostor, nazývaný podílem mrtvého prostoru dosahoval v běžných tavicích zařízeních nezřídka 0,5, v některých zařízeních byl i větší. Bylo tedy zřejmé, že charakter proudění hraje pro 10 efektivnost tavicího procesu významnou úlohu. Cooper [4] o něco později definoval na základě údajů o typu proudění a o kinetice tavicích procesů veličinu, která je poměrem mezi rychlostní konstantou řídícího tavicího děje a rychlosti toku hmoty, která poskytuje stupeň ukončení daného procesu v daném místě nebo na trajektorii prostorem. Práce vyzdvihuje význam charakteru proudění pro tavicí procesy.

15 Hledání efektivního způsobu tavení skel vyžadovalo velmi podrobnou znalost podmínek, za nichž tavicí proces v průmyslovém prostoru probíhá. Takovou znalost poskytloteprve matematické modelování průběhu tavicího procesu v provozovaných sklářských vanách. Aplikace matematických modelů poskytly podrobné teplotní i rychlostní pole taveniny v tavicích prostorech a umožnily tak modelování tavicích procesů přímo při průtoku 20 směsi konkrétním tavicím prostorem [5-24]. Výsledky potvrzovaly závěry získané předchozími zkušenostmi a měřeními. V tavicích prostorech se ustavoval poměrně komplikovaný typ proudění sestávající z kombinací podélně i příčně rotujících oblastí a z průtočného proudu, který byl cirkulacemi taveniny silně ovlivňován. Rozpouštěcí proces probíhal za poměrně nevýhodných teplotních podmínek [20], čerací proces byl v podstatě 25 omezen na malou oblast teplotního maxima v tavenině [19-24] a tavicí prostory indikovaly vysoký podíl mrtvého prostoru [12]. Významným problémem tavicích procesů byl průběh tzv. kritických drah, tj. drah taveniny tavicím prostorem, na nichž dojde k dokončení příslušného homogenizačního procesu z hlediska času nejbližší k výstupu z prostoru. Často se vyskytovaly dráhy zkratové procházející prostorem s nízkými dobami zdržení, navíc za 30 nepříliš výhodných teplotních podmínek, které podstatně limitovaly tavicí výkon daného prostoru a zvyšovaly specifickou spotřebu energie na tavicí proces. Objevily se tak snahy takové zkratové dráhy odstranit ovlivněním proudění [25]. Složitě přirozené proudění v tavicích agregátech bylo přitom velmi obtížné podstatněji ovlivnit správným směrem, neboť optimální charakter proudění v tavicích prostorech nebyl podrobněji vyzkoumán. Cooper [26]

však již dříve na základě jednoduchého matematického modelu proudění skelné taveniny v jednoduchém modelovém prostoru charakterizuje na odděleném typu podélného a příčného proudění některé důsledky daného typu proudění pro homogenizaci taveniny (např. urychlení homogenizace procesů i teplot příčným prouděním). Tyto výsledky ukazují na potřebu

5 ovlivňovat proudění v tavicích prostorech na základě podrobné znalosti vztahu mezi jednotlivými typy proudění a znalosti jejich vlivu na příslušný homogenizační proces. Nedávné globální výzvy k energeticky, materiálově a ekologicky méně náročným technologiím - k nimž patří i sklářská technologie - vyvolaly další aktivity zahrnující jak změny týkající se nutných dob zdržení taveniny v tavicím prostoru, tak změny v celkovém

10 uspořádání tavicího procesu [27]. Potřeba takových změn však vyžaduje aplikaci nových principů do tavicího procesu, zahrnující i změny prostorového uspořádání procesu, např. v podobě tak zvaných segmentových tavicích zařízení, v nichž se dílčí procesy uskutečňují odděleně, alternativní charakteru otopu atd. Bylo tedy zřejmé, že dosažení těchto výzev vyžaduje částečný odstup od běžně modelovaných existujících průmyslových zařízení

15 k jednoduchým modelovým prostorům pracujícím za přesně definovaných podmínek, na kterých lze principy dostatečně poznat, najít jejich obecné zákonitosti umožňující později bezpečnou aplikaci. Takový postup zahrnuje i snahy odstranit nevýhody přirozeně ustaveného proudění ve sklářských tavicích pecích.

20 **Podstata vynálezu**

Uvedené nevýhody klasického tavení skla se odstraní nebo podstatně omezí u způsobu kontinuálního tavení skel řízenou konvekcí skloviny, při němž se působí na roztavené sklo, obsahující nerozpuštěné částice, zejména sklářského písku a nacházející se v horizontálně

25 orientovaném průtočném tavicím prostoru sklářské pece, prostřednictvím zdrojů energie, jako jsou např. topné elektrody, průmyslové sklářské hořáky, případně jiné vhodné topné zdroje energie, podle tohoto vynálezu. Podstata tohoto vynálezu spočívá v tom, že zdroje energie působí v tavicím prostoru nejméně v jedné řadě v podélné ose tavicího prostoru, nebo paralelně s podélnou osou. Zdroje energie vyvolávají spirálovité proudění skloviny s

30 kruhovým pohybem napříč tavicí částí, které postupuje od zakládací stěny k příčné přehradní zdi ve sklovině případně příčné řadě zdrojů energie. Příčný teplotní gradient každého spirálovitého proudění je vždy vyšší než jeho podélný teplotní gradient mezi příčnou přehradní zdí ve sklovině, případně příčnou řadou zdrojů energie a přivrácenou zakládací stěnou.

Hlavní výhodou tohoto vynálezu je markantní snížení prostor v tavicí části, t. zv. mrtvých prostor, tedy míst, kde proces tavení neprobíhá nebo jen s velmi malou až nulovou účinností a sklovina je v těchto místech neproduktivně ohřívána a zvyšují se tak i tepelné ztráty. Významnou předností tohoto vynálezu je možnost nastavení poměru příčného

5 teplotního gradientu k podélnému teplotnímu gradientu, který je vytvořen vhodným uspořádáním zdrojů energie, a který vyvolá příznivé podmínky pro spirálovité proudění skloviny tavicím prostorem. To zabezpečuje i rovnoměrné rozložení teplot v tavicím prostoru a optimální homogenizační schopnost proudění skloviny. Dochází tak k významnému snížení tepelných ztrát a podstatnému zvýšení tavicího výkonu sklářské pece, které případně

10 umožňuje návrh na zmenšení tavicí části a tím i úsporu nákladů na konstrukci sklářské tavicí pece.

Je výhodné, když poměr příčného teplotního gradientu ku podélnému teplotnímu gradientu je v rozmezí 1 až 30, což představuje reálné nejširší meze. Optimálně je tento poměr využit v rozmezí 5 až 20. Pokud je tento poměr nižší než 1, potom ke spirálovitému

15 proudění skloviny nedojde. Pokud by byl tento poměr vyšší, nastalo by rovněž výhodné spirálovité proudění, avšak účinnost nastavování tohoto poměru nevyváží technické problémy při realizaci.

Výhodné spirálovité proudění skloviny prochází prostorem, jehož využití pro rozpouštění částic, zejména sklářského písku, představuje 0,6 až 0,8 z celkového prostoru, vymezeného výškou h skloviny, délkou l mezi příčnou přehradní zdí ve sklovině případně

20 příčnou řadou zdrojů energie a přivrácenou základní stěnou a šířkou w mezi protilehlými bočními stěnami. Spirálovité proudění podle tohoto vynálezu přináší nejvyšší dosud známé definované využití tavicího prostoru. Využití tavicího prostoru představuje velikost využitě části tavicího prostoru k nevyužitému.

Proudění skloviny má vynikající homogenizační funkci a dochází tak ke zkrácení procesu rozpouštění těžko tavitelných částic, zejména sklářského písku případně korundových částic. Definované uspořádání zdrojů energie zabezpečuje účinné dosažení

25 požadovaného spirálovitého proudění skloviny. Tavicí prostor vykazuje nižší tepelné ztráty a vysoký tavicí výkon, který dovoluje případné zmenšení tavicí části a v důsledku i

30 konstrukční úspory.

Zdroje energie jsou uspořádány v jedné nebo obou bočních stěnách tavicího prostoru. Pokud jsou zdroje energie upořádány v jedné boční stěně tavicí části, vzniká jedno spirálovité proudění napříč celou tavicí částí, což je vhodné pro úzké tavicí části. Pokud jsou zdroje energie uspořádány v obou bočních stěnách, vznikají dva v podstatě symetrická spirálovitá

proudění oddělená podélnou osou tavicí části, což je vhodné pro tavicí prostory s obtížným přístupem obsluhy ke dnu v případě posunu nebo výměny topných elektrod. U větších sklářských pecí, tedy i s větším tavicím prostorem a šířkou, je možno využít instalace topných elektrod ve dně ve dvou i více řadách v podélném směru tavicího prostoru. V tomto případě vznikají spirálovitá proudění jednak mezi každou boční stěnou a řadou topných elektrod, i mezi jednotlivými řadami elektrod.

Zdroje energie jsou uspořádány v pravidelných vzájemných odstupech. Pravidelné odstupy zajišťují rovnoměrné prohřívání taveniny, a tím i příznivé rovnoměrné proudění skloviny.

Zdroje energie jsou topné elektrody a/nebo průmyslové sklářské hořáky. Jako nejvýhodnější pro spirálovité proudění jsou topné elektrody z důvodů přímého vybavení energie do skloviny a snadnou regulaci topných elektrod. Topné elektrody mohou být uspořádány ve dně jako svislé nebo šikmé, nebo mohou na sklovinu působit seshora jako svislé. Jako vhodné se jeví deskové elektrody instalované v bočních stěnách. Mohou být i jiné zdroje topné energie, např. mikrovlny případně plasmové hořáky.

Tavicí část může být zakončena příčnou řadou topných elektrod instalovaných ve dně. Tato příčná řada topných elektrod vytvoří příčnou tepelnou bariéru, která je alternativou příčné přehradní zdi, a mimoto umožňuje lepší regulaci tepelného výkonu v závislosti na tavicím výkonu sklářské pece.

U velmi malých tavicích prostorů pro speciální skla je možno jako zdrojů energie využít i jiné zdroje, např. mikrovlny, plasmové hořáky případně odporové zdroje v bočních stěnách, případně nepřímé zdroje topné energie v bočních stěnách, superkanalové smyčky.

Přehled obrázků na výkresech

25

Stav techniky představují obr. 1a a obr. 1b, převzaté z W. Trier, Advances in Glass Technology, Plenum Press, 1962, str. 619, kde

obr. 1a znázorňuje podélný osový řez sklářskou pecí za konstantní teploty, bez cirkulací a

30 obr. 1b znázorňuje podélný osový řez sklářskou pecí za přítomnosti teplotních gradientů a tedy i s cirkulací.

Vynález je podrobně popsán v následném popisu vynálezu, který je obecně osvětlen na připojených schematických výkresech, z nichž představují

obr. 2 axonometrický pohled na zjednodušený základní model tavicího prostoru s plným vstupem a výstupem,

5 obr. 3 axonometrický pohled na zjednodušený tavicí prostor se zjednodušenou kritickou trajektorií skloviny a rozpouštějící se částicí sklářského písku za nastaveného optimálního proudění,

obr. 4 grafická závislost maximálního využití modelového tavicího prostoru, na době rozpuštění částic sklářského písku a na délce modelového kanálu tavicího prostoru.

10

Příkladná provedení 1 až 4 schematicky znázorňují na

obr. 5 - 24 svislý podélný osový řez navrhovaného modulu sklářské vany s tavicí částí typického tvaru a uspořádání zdrojů tepla, elektrod, a to

na obr. 5 – 22 svislých topných elektrod a

15 na obr. 23, 24 kombinací svislých topných elektrod s hořáky situovanými v bočních stěnách.

Podrobněji, příkladné provedení 1 pro tavení plochého skla je vyobrazeno na obr. 5 – 13, kde je schematicky znázorněno na

20 obr. 5 tavicí část typického tvaru a uspořádání svislých elektrod, s dolním vstupem a dolním výstupem,

obr. 6 tavicí prostor z obr. 5 pro tavení plochého skla, s horním vstupem a dolním výstupem skloviny,

25 obr. 7 výsledné rozložení rychlostí, znázorněném úseky trajektorií taveniny uraženými za 30s, v podélném osovém řezu tavicím prostorem z obr. 6,

obr. 8 průměty kritické trajektorie a dalších kritické trajektorií nejbližších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu tavicím prostorem z obr. 6, pro referenční případ,

30 obr. 9 výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem, které je znázorněné úseky trajektorií taveniny uraženými za 30s tavicím prostorem z obr. 6, pro optimální případ,

obr. 10 průměty kritické trajektorie a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu tavicím prostorem z obr. 6, pro optimální případ,

obr. 11 tavicí prostor pro tavení plochého skla s dolním vstupem a dolním výstupem.

obr. 12 výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem z obr. 11
znázorněné úseky trajektorií taveniny ураženými za 30s, pro optimální případ,

obr. 13 průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do
5 podélného osového vertikálního řezu prostorem z obr. 11, pro optimální případ.

Příkladné provedení 2 pro výrobu brýlových výlisků je vyobrazeno na obr. 14- 16, kde
jsou schematicky znázorněna na

10 obr. 14 výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné
úseky trajektorií taveniny ураženými za 30s, pro referenční případ,

obr. 15 průměty kritické trajektorie a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn
písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem, pro referenční případ,

obr. 15 výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné
úseky trajektorií taveniny ураženými za 30s, pro optimální případ,

15 obr. 16 výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné
úsek trajektorií taveniny ураženými za 30 s,

obr. 17 průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do
podélného osového vertikálního řezu prostorem, pro optimální případ.

20 Příkladné provedení 3 pro výrobu obalové skloviny výlisků je vyobrazeno na

obr. 18a – 22, kde je schematicky znázorněn tavicí prostor

obr. 18a v podélném řezu,

obr. 18b v příčném řezu pod hladinou skloviny,

25 obr. 19 výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné
úseky trajektorií skloviny ураženými za 30s, pro referenční případ,

obr. 20 průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do
podélného osového vertikálního řezu prostorem, pro referenční případ,

obr. 21 výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné
úseky trajektorií skloviny ураženými za 30s, pro první optimalizovaný případ,

30 obr. 22 průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do
podélného osového vertikálního řezu prostorem, pro první optimalizovaný případ,

Příkladné provedení 4 pro výrobu užitkového skla je schematicky vyobrazeno na
obr. 23 - 24, kde je schematicky znázorněn tavicí prostor v podélném osovém řezu, a na

obr. 23 s otápěním hořáků v bočních stěnách, pro referenční případ a

obr. 24 s otápěním vertikálních elektrod a bočních hořáků, pro optimální případ.

Příklady provedení vynálezu

5

W. Trier, *Advances in Glass Technology*, Plenum Press, 1962, str. 619 ukazuje na připojeném obr. 1a typický obraz proudění v podélném osovém řezu horizontální sklářskou tavicí pecí bez cirkulací za konstantní teploty a na připojeném obr. 1b reálný obraz obraz proudění horizontální sklářskou pecí za přítomnosti teplotních gradientů, tedy i cirkulací.

10 Přírozeně vzniklý typ proudění skloviny zřejmý z obr. 1b měl především v tavicích částech sklářských pecí podstatný vliv na průběh tavicího procesu a tím i na efektivnost celého tavicího zařízení z hlediska jeho výkonu i z hlediska spotřeby energie na tavicí proces. Pro průběh tavicího procesu měl vzniklý typ určité výhody spočívající především ve faktu, že

15 ukazuje levý cirkulační okruh v obr. 1b přinášel do oblasti reagujících surovin velmi potřebné teplo na ohřátí i reakce surovin. Druhou výhodou přirozeného proudění byl často přítomný zpětný tok skloviny od průtoku do oblasti tavicích teplot, jak je znázorněn na obr. 1b, ve spodní části pravého cirkulačního okruhu. Zpětný tok vracel zpět do tavicího procesu nehomogenity, především bubliny, které byly důsledkem nedokonalého průběhu tavicího

20 procesu. Nevýhodou ustaveného typu proudění byl pak vzniklý průběžný tok skloviny od vrstvy vsázky ke dnu tavicí pece, kde se pohyboval vpřed za nejnižších teplot až k oblasti maximálních teplot, kde jej teprve cirkulační proudění vyneslo k vysokým teplotám u hladiny. Důsledkem tohoto proudění byla pomalá homogenizace skloviny (rozpuštění částic a chemických nehomogenit) a praktická absence čerčícího procesu (výstupu bublin) v podstatné

25 části aktivního pecního prostoru u dna pece. Zatímco rozpouštěcí procesy se mohly dokončit po vynesení skloviny od dna k hladině, proces odstraňování primárních bublin ve vysokoteplotní oblasti u hladiny prakticky teprve začínal. Oba procesy tak probíhaly v oblasti po reakcích sklářské vsázky v podstatě sériově, při čemž rozpouštění se uskutečňovalo po většinu potřebného času za nízkých teplot u dna pece. Návaznost procesů (namísto jejich

30 intenzivního paralelního průběhu) a velký podíl nepříznivých podmínek během rozpouštěcího procesu se odrazil ve vysokých tepelných ztrátách tavicího procesu a v malé specifické tavicí výkonnosti agregátů, která si při vyšších plánovaných výkonech vyžádala poměrně mohutná zařízení. Navíc se ukázalo, že ustavené cirkulační proudění při nízkých specifických výkonech tavicích prostorů vytváří v prostorech významné objemy dlouhodobě cirkulující

skloviny, v nichž tavicí proces v podstatě neprobíhá (mrtvé prostory - prostory „overprocessing“). Tato sklovina je tedy udržována na tavicí teplotě bez vlastního efektu a způsobuje zbytečné tepelné ztráty.

V nedávné minulosti se autoři této přihlášky začali zabývat podrobně vlivem charakteru proudění na dva nejvýznamnější tavicí procesy, tj. rozpouštění nezreagovaných částic sklářského kmene, které zastupuje ve většině případů sklářský písek a na odstranění bublin (čeření), většinou nejpomalejší tavicí proces [28-35]. Jako kritéria kvality proběhnuvšího tavicího procesu definovali měrnou spotřebu energie a měrný tavicí výkon daného tavicího prostoru. Jako modelový tavicí prostor zvolili průtočný horizontální prostor tvaru kváдру se vstupem i výstupem celými čelními stěnami nebo jejich částmi. Jeho schéma je na obrázku 2, tvar tavicího prostoru byl jednoduchý se snahou dosáhnout co nejobecnějších výsledků, rozměry zařízení byly malé v souladu se snahou miniaturizovat příští tavicí prostor - délka 1m, šířka a výška hladiny skloviny 0,5 m. Vyšetřování bylo vedeno s možností aplikovat výsledky na jiné rozměry reálného zařízení. Jako prostředek vyšetřování byl zvolen matematický model tavicího prostoru s možností široké variability podmínek.

Na obr. 2 je schematicky znázorněno schéma zjednodušeného modelového tavicího prostoru s plným vstupem a výstupem. Příslušný charakter proudění byl nastavován pomocí lineárních teplotních gradientů vložených na hladinu skloviny, dno a stěny prostoru byly izolovány. Protože rozpouštěcí proces a proces odstraňování bublin se uskutečňují na rozdílných principech, bylo vyšetřování prováděno pro každý proces separátně s tím, že při aplikacích bude zvolen kompromis mezi optimálními podmínkami, nebo bude navržen pro každý proces oddělený segment zařízení.

Aby mohly být výsledky sledování dobře pochopeny, je třeba uvést teoretický základ vyšetřování, pro tuto přihlášku se týkající rozpouštění částic sklářského písku, který je obvykle hlavní součástí většiny průmyslových skel a představuje sklářskou surovinu, která se nejobtížněji a jako poslední v tavenině skla rozpouští.

Pro proces bez recyklace energie jsou kritéria měrná spotřeba energie a objemový výkon tavicího prostoru popsány následujícími rovnicemi zahrnujícími již odděleně dobu trvání procesu (jeho kinetiku) a vliv charakteru proudění. Vliv charakteru proudění je vyjádřen nově zavedenou veličinou nazvanou využitím tavicího prostoru, u_D [31, 33-35]:

$$H_M^0 = H_M^T + \frac{\dot{H}^L \bar{\tau}_D}{\rho V} \frac{1}{u_D} \quad (1)$$

$$\dot{V} = \frac{V}{\bar{\tau}_D} u_D, \quad (2)$$

kde H_M^0 je měrná spotřeba energie [Jkg^{-1}]; H_M^r je teoretické teplo potřebné pro chemické reakce, fázové a modifikační přeměny a ohřev vstupující směsi a vznikající skloviny na tavicí teplotu [Jkg^{-1}]; $\dot{H}^L$ je celkový tok tepla rozhraními do okolí [Js^{-1}]; $\bar{\tau}_D$ je střední doba rozpuštění všech částic sklářského písku za různých v prostoru se uplatňujících časově teplotních režimů [s]; ρ je měrná hmotnost skla [kg/m^3]; V je objem tavicího prostoru [m^3]; $\dot{V}$ je objemový průtok skloviny prostorem za předpokladu dokončení tavicího procesu [m^3s^{-1}] a u_D je využití tavicího prostoru pro rozpouštění. Zde u_D vyjadřuje vztah mezi středním časem pro proběhnutí procesu samotného, $\bar{\tau}_D$, a teoretickou dobou zdržení skloviny v tavicím prostu, tzv. geometrickou dobou zdržení, která je rovna podílu objemu a objemového průtoku

prostorem $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$:

$$u_D = \frac{\bar{\tau}_D}{\tau_G}, \quad u_D \in \langle 0; 1 \rangle \quad (3)$$

Z rovnic (1-2) je patrné, že měrná spotřeba energie je nepřímo úměrná a objemový výkon přímo úměrný využití tavicího prostoru.

Výraz pro využití tavicího prostoru v případě rozpouštění pískových zrn je složen ze dvou podílů mrtvých prostorů, kde m_G zahrnuje uzavřené cirkulace a oblasti téměř statické skloviny (např. rohy). Tato hodnota byla již dříve zjišťována např. metodou přechodových charakteristik, jak bylo uvedeno v předchozím textu. m_D pak označuje oblast, kde jsou již všechna zrna písku rozpuštěna, avšak příslušná sklovina je stále ohřívána v prostoru (overprocessing). Využití tavicího prostoru pro rozpouštění písku je pak dáno:

$$u_D = (1 - m_G)(1 - m_D); \quad m_G = \frac{\tau_G - \bar{\tau}}{\tau_G}; \quad m_D = \frac{\bar{\tau} - \bar{\tau}_D}{\bar{\tau}}, \quad (4)$$

kde $\bar{\tau}$ je průměrná doba zdržení průtočně proudící skloviny prostorem, střední doba rozpuštění pískových zrn za izotermních nebo téměř izotermních podmínek pak splňuje: $\bar{\tau}_D = \tau_D = \tau_{Dcrit}$, kde τ_D je doba potřebná pro rozpuštění všech pískových zrn za dané nebo průměrné teploty a τ_{Dcrit} je doba zdržení skloviny na nejrychlejší (kritické) trajektorii. Výpočet využití tavicího prostoru pracuje pak s hodnotami dob rozpuštění pískových zrn a s výsledky modelování rozpouštěcího procesu v modelovém tavicím prostoru za časově teplotních

režimů na trajektoriích skloviny (neuvažuje se tedy nepatrná vztlaková síla působící na částice písku).

Konkrétně se při zkoumání vlivu charakteru proudění na výkon a měrnou spotřebu energie pracuje za konstantní doby rozpuštění pískových zrn nebo při konstantní teplotní závislosti doby rozpuštění na teplotě, vliv zde existující velmi pomalé konvekce skloviny na rychlost rozpouštění pískových zrn se neuvažuje. Hodnoty dob rozpuštění částic sklářského písku se stanoví experimentálně. Aby bylo možno srovnávat mezi sebou jednotlivé případy, je stanoven referenční stav. Při dosažení referenčního stavu je poslední – kritická – částice rozpuštěna právě na výstupu z tavicího prostoru. Technologicky odpovídá takový stav stavu procesu probíhajícího “bez rezervy” a reálné výkony by ve skutečnosti byly nižší. Výslednou konkrétní hodnotou modelování je hodnota využití prostoru u_D , která je za konstantní kinetiky rozpouštění přímo úměrná výkonu prostoru (rovnice 2) a nepřímo úměrná měrné spotřebě energie (rovnice 1). Pro informaci je hodnota u_D pro tavicí prostor typu tavicího prostoru za předpokladu pístového toku rovna 1 a pro izotermní tavicí prostor s parabolickým rozložením rychlostí skloviny je rovna 0,445. Vyšší hodnota je však dosažitelná pouze u ideální kapaliny, izotermní tok skloviny je pak obtížně realizovatelný v tavicích prostorech s vysokou teplotou, kde již několikastupňový horizontální rozdíl teploty vyvolá účinné cirkulační proudění a snížení u_D .

Na daném modelovém tavicím prostoru bylo provedeno podrobné vyšetření vlivu elementárních a smíšených typů proudění, kde jako základní typy proudění byly uvažovány čisté podélné cirkulační proudění ve směru i proti směru hodinových ručiček (cirkulace probíhají ve vertikálních rovinách rovnoběžných s hlavním-pracovním směrem proudění) a příčné proudění, kde cirkulace probíhají v rovinách kolmých k hlavnímu-pracovnímu směru proudění. Smíšená proudění pak zahrnovala typy proudění, jejichž poměr intenzity byl nastavován poměry mezi vloženými horizontálními teplotními gradienty. Ukázalo se, že oba typy podélného proudění mají za následek vznik velkých mrtvých prostor, kde využití tavicího prostoru dosahovalo hodnot pouze 0,1 až 0,2, zatímco nastolení čistého příčného proudění poskytovalo hodnoty využití 0,4 až 0,5 v důsledku mizení části mrtvých prostor. Nejlepších výsledků bylo však dosaženo u smíšeného typu proudění, kde rychlá složka dopředného proudění u hladiny skloviny byla bržděna malým teplotním gradientem s vyšší teplotou u výstupu z prostoru a kde bylo vyvoláno poměrně intenzivní příčné proudění příčným teplotním gradientem, přičemž byl absolutní poměr mezi velikostmi příčného a podélného teplotního gradient roven 5 až 10. Tento optimální typ proudění se vyznačoval

spirálovitými trajektoriemi skloviny, jak ukazuje obrázek 3, a velmi malou hodnotou mrtvého prostoru m_G i částečně zredukovanou hodnotou mrtvého prostoru m_D (viz rovnice (4)).

Další výzkum pak ukázal, jak se tento optimální typ proudění a podmínky jeho nastavení mění při změnách nezávislých proměnných, kterými byl již zmíněný poměr mezi
 5 intenzitou příčného ku podélnému proudění, celková intenzita cirkulačního proudění, doba rozpuštění částic sklářského písku a délka tavicího prostoru. Vliv vlastností skla a výšky vrstvy skloviny je pak možno zahrnout do vlivu celkové intenzity proudění. Šířka prostoru při zachování teplotních gradientů využití v podstatě neovlivní. Pro každou dvojici doby
 10 rozpuštění částic sklářského písku v dané sklovině a délky tavicího prostoru při zachování výšky vrstvy skloviny je pak možno nalézt maximální hodnotu využití tavicího prostoru pro rozpouštěcí proces. Tyto maximální hodnoty se v širokém rozmezí dob rozpuštění písku a délek kanálu tavicího prostoru pohybovaly nad 0,5; ve většině případů dokonce mezi 0,6 až 0,8, což byly hodnoty znatelně lepší, než lze dokonce dosáhnout v izotermním tavicím prostoru. Závislost těchto maximálních hodnot využití na obou zmíněných veličinách v
 15 modelovém tavicím prostoru je uvedena v obrázku 4. Na obr. 4 je znázorněna závislost maximální hodnoty využití tavicího prostoru na době rozpuštění sklářského písku pro různé délky tavicího prostoru. Ze znázorněných závislostí je zřejmé, že maximální hodnoty využití tavicího prostoru rostou jak s dobou rozpouštění písku, tak s délkou tavicího prostoru. Současně byly nalezeny zákonitosti, jimiž se řídí hodnoty teplotních gradientů, které je třeba
 20 nastavit pro dosažení optimálního využití tavicího prostoru.

Získané výsledky prokázaly, že je možné nalézt a definovat optimální typ spirálovitého proudění z hlediska rozpouštění částic sklářského písku a definovat optimální podmínky pro jeho dosažení. Byly definovány i zákonitosti změn optimálního využití a optimálních podmínek při změnách vstupních parametrů. Byly tedy získány předpoklady pro
 25 přenos výsledků na reálné tavicí prostory.

Příklad 1

(Obr. 5 až 13)

Pro aplikaci výsledků je však třeba definovat konkrétní tavicí prostor, konkrétní zdroje
 30 energie, jejich rozmístění a tepelný výkon umožňující nastavení žádoucího typu spirálovitého proudění, což je předmětem této přihlášky vynálezu.

Dosažením cíle je navrzení speciálního sklářského tavicího prostoru pro rozpouštění součástí sklářské vsázky, především sklářského písku, to jest navrzení tvaru a vhodných rozměrů tavicího prostoru, jeho typického materiálového složení, způsobu ohřevu a

rozmístění zdrojů tepla v tavicím prostoru a dále definice rozložení energie na jednotlivé zdroje tepla tak, aby tavicí proces probíhal za předem známé průměrné teploty a aby bylo dosaženo typu spirálovitého proudění, který zajišťuje vysoké využití tavicího prostoru pro proces rozpouštění sklářského písku. Pro dosažení tohoto stavu se použije předepsaný postup

5 matematického modelování tavicího prostoru spojený s výpočtem jeho využití.

Při realizaci procesu podle návrhu tohoto vynálezu se působí na roztavené sklo, obsahující nerozpuštěné částice sklářského písku a nacházející se v horizontálním průtočném tavicím prostoru, zdroji energie, zpravidla topnými elektrodami nebo průmyslovými sklářskými hořáky tak, že v roztaveném skle vznikne rozložení teplot, které vyvolá spirálovitý

10 typ proudění ve směru průtoku skloviny prostorem, čímž se docílí vysokého využití daného tavicího prostoru pro rozpouštěcí proces, tedy i vysokého výkonu prostoru a nízkých měrných ztrát energie.

Jako speciální prostor se jeví kvádr, jehož délka je zpravidla větší než jeho šířka a výška hladiny skloviny v tavicím prostoru sklářské pece. Tavicí prostor je horizontálně

15 orientovaný, průtočný a oddělený a zahrnuje dno 1, základací stěnu 2 a protilehlou zadní průtokovou stěnu 3 a mezi nimi uspořádané protilehlé boční stěny 4, klenbu 5 a do skloviny 6 ponořenou příčnou přehradní zeď 7. V tavicím prostoru jsou uspořádány zdroje energie nejméně v jedné řadě v podélné ose tavicího prostoru, nebo paralelně s touto podélnou osou, a to mezi základací stěnou 2 a příčnou přehradní zdí 7 ve sklovině 6 případně příčnou řadou

20 9 zdrojů energie v tavicí části skloviny 6 pro vyvolání spirálovitého proudění skloviny 6 s kruhovým pohybem napříč tavicí částí. Zdroji energie jsou přednostně topné elektrody 10 případně průmyslové hořáky 11.

Směs roztaveného skloviny 6 s nehomogenitami vstupuje do tavicího prostoru horním vstupem nebo dolním vstupem 12, který může být zúžený nebo zabírat celou šířku tavicího

25 prostoru a může mít různou výšku. Příliš úzký vstup 12 a výstup 13 však ovlivňují nastavovaný charakter proudění v prostoru, a proto se doporučuje, aby vstup 12 nebo výstup 13 nezabíral menší plochu než asi 20% čelní základací stěny 2 nebo zadní průtokové stěny 3. Tavicí prostor je vyložen žárovzdornou vyzdívkou běžně používanou ve sklářských tavicích pecích. Jako ohřev se dle výsledků modelování nejlépe osvědčil elektrický ohřev

30 prostřednictvím elektrod 10, které jsou zpravidla molybdenové. Je však použitelný i ohřev plynovými nebo olejovými hořáky 11, především v kombinaci s elektrickým ohřevem. Schéma typického navrhovaného tavicího prostoru otápěného elektricky je uvedeno v obrázku 5.

Tavicí proces probíhá v rozmezí teplot vhodných a běžných při tavení průmyslových skel, konkrétní teplota je závislá na typu skla, ale u běžných skel je třeba počítat s průměrnými tavicími teplotami 1300 až 1500 °C. Kontinuální průtok je zajištěn přítokem směsi skloviny skla s pevnými i plynnými nehomogenitami z předchozího prostoru, kde se vstupní směs sklářských surovin ohřeje a roztaví a odběrem do dalšího prostoru, kde se případně dokončí homogenizace, odstraní se bubliny, nebo se pouze ustálí teploty a uskuteční odběr hotové skelné skloviny. Výkon tavicího prostoru se kromě nastavení vhodného typu spirálovitého proudění, jenž je předmětem tohoto vynálezu, dá upravovat zrnitostí pevných částic (pískových zrn), úpravou složení výsledného skla a průměrnou teplotou v rozpouštěcím prostoru. V tavicím prostoru sklářské pece se přítokem a odběrem udržuje stejné množství skloviny 6.

Typický tvar a uspořádání zdrojů tepla, elektrod 10, v navrhovaném modulu pro rozpouštění ukazuje obr. 5.

Základem předloženého vynálezu je dosažení určitého typu spirálovitého proudění v průtočném prostoru uspořádáním zdrojů tepla, případně dimenzováním izolace sklářské pece tak, aby v tavicím prostoru vzniklo účinkem obou faktorů příčné cirkulační proudění, které bude simulovat optimální typ spirálovitého proudění, zjištěný při vyšetřování modelového prostoru s vloženými teplotními gradienty. Toto příčné cirkulační proudění má částečně potlačenou rychlou podélnou složku pohybu taveniny skla u hladiny, aby se zmenšily rozdíly mezi dobami zdržení skloviny 6 na různých trajektoriích. Toho je v navrhovaném prostoru možno dosáhnout např. podélnou řadou elektrod 10 umístěných zpravidla ze dna 1 sklářské pece tak, aby vznikla podélná tepelná bariéra buď v podélné ose tavicího prostoru, kde budou též umístěny elektrody 10, nebo vznikla podélná oblast nejvyšších teplot u některé z bočních stěn 4 tavicího prostoru, kde by byla rovněž umístěna podélná řada elektrod 10. U tavicích prostorů navrhovaných pro velký výkon je možno umístit i více než jednu podélnou řadu elektrod 10, ale toto uspořádání se jeví jako méně výhodné pro zpomalení horizontální složky rychlosti u hladiny. Pro lepší dosažení žádoucího typu spirálovitého proudění je doporučené, ne však nutné, umístit do prostoru i další zdroje, např. příčnou řadu 9 elektrod 10, která lépe zajistí zbrzdění rychlé dopředné složky proudění u hladiny nebo zabrání vzniku podélného cirkulačního proudění skloviny 6. Podobným způsobem je třeba uspořádat i hořáky 11 nad hladinou sklářské pece, a to buď hořáky 11 umístit v klenbě 5 pece, nebo v bočních stěnách 4 a orientovat je tak, aby se v tavicím prostoru vytvořila teplotní bariéra v podélné ose sklářské pece nebo u jedné z bočních stěn 4. Při použití hořáků 11 jako tepelných zdrojů je možné použít současně elektrod 10, převážně v podélné ose tavicího

prostoru nebo u některé ze stěn, které podpoří vytvoření podélné teplotní bariéry. Rozložení energie na zdroje tepla, případně potřebná izolace tavicího prostoru nebo jeho částí, zajišťující optimální charakter spirálovitého proudění, se musí nastavit cíleným matematickým modelováním tavicího prostoru. Pro modelování je třeba experimentálně zjistit závislost doby rozpuštění sklářského písku na teplotě v předpokládaném teplotním rozmezí tavení. U skel podobného složení a stejné zrnitosti zrn sklářského písku je možno použít stejné teplotní závislosti. Modelováním se zjišťuje tavicí výkon a měrná spotřeba energie tavicího prostoru pracujícího v kritickém režimu, tj. bez rezervy, tj. poslední rozpouštějící se částice se rozpustí právě na výstupu 13 z tavicího prostoru. Rozložení energie na zdrojích se postupně nastaví tak, že se dosáhne stavu, kdy vypočtená hodnota využití tavicího prostoru dosáhne maximální dosažitelné hodnoty, nebo je hodnota nejvyšší při technicky dosažitelném uspořádání. Při modelování je možno provést korekce i v uspořádání zdrojů tepla, ale vždy s cílem vytvoření požadovaného typu spirálovitého proudění. Požadované hodnoty využití prostoru by se měly pohybovat alespoň kolem hodnoty 0,4, avšak spíše nad hodnotou 0,5.

Je samozřejmě velmi užitečné odhadnout, jak se bude spirálovité proudění a jemu odpovídající využití tavicího prostoru chovat při krajních hodnotách nastavení, tj. při velmi nízkých či velmi vysokých poměrech intenzit příčného a podélného proudění s potenciálním zpětným tokem u hladiny skloviny 6, při nízkých nebo velmi vysokých intenzitách cirkulací skloviny 6, při velmi pomalém nebo velmi rychlém rozpouštění nebo u krátkých nebo naopak velmi dlouhých tavicích prostorů.

Velmi nízký poměr příčného proudění při existenci proudění podélného, povede vždy k poklesu využití a při rostoucích intenzitách podélného proudění se bude blížit nule. Naopak při velmi vysokém poměru intenzit příčného ku podélnému proudění se bude hodnota využití přibližovat a posléze setrvávat kolem 0,5.

V oblasti poměru mezi intenzitami proudění skloviny 6, který je vyjadřován poměrem příčného ku podélnému teplotnímu gradientu rovným 5 až 20, bude využití dosahovat maximálních hodnot 0,6 až 0,8. Zde je tedy technologicky výhodná oblast charakterizovaná maximální hodnotou využití prostoru. V jiné oblasti poměru intenzit proudění nemá význam pracovat prakticky při jakýchkoliv celkových intenzitách proudění, rychlostech rozpouštění nebo délkách tavicího prostoru.

Maximální hodnoty využití tavicího prostoru v tomto rozmezí poměru pak dosahují hodnoty 0,445 při nulové intenzitě cirkulačního proudění, kdy sklovina 6 protéká izotermním pravoúhlým tavicím prostorem, a s růstem celkové intenzity cirkulačního proudění, postupně dosahují hodnot 0,6 až 0,8 za běžně dosažitelných hodnot intenzity cirkulací, a dosahují

hodnot 0,5 až 0,6 za vysokých intenzit cirkulací, kterých se však za běžných podmínek nedosáhne. Maximální hodnoty využití v oblasti optimálního poměru mezi intenzitami příčného a podélného proudění jsou málo závislé na rychlosti rozpouštění a pohybují se v širokém rozmezí v mezích 0,6 až 0,8. Velmi krátké kanály tavicího prostoru vykazují nízké

5 hodnoty využití, protože se v nich nestačí vyvinout spirálovitý tvar proudění, hodnoty klesají k 0,4 při délce tavicího prostoru 0,5 m, a budou se přibližovat hodnotě 0,4 u ještě kratších prostorů. U velmi dlouhých kanálů tavicího prostoru se hodnota využití bude udržovat poměrně vysoko, kolem 0,6 a výše, bude však neúměrně stoupat nutný optimální poměr mezi intenzitou příčného a podélného proudění.

10 Konkrétním cílem je pak přenesení charakteru teplotního pole vytvořeného v modelovém tavicím prostoru pomocí gradientů teplot na navrhovaný konkrétní tavicí prostor, lišící se od modelového především tím, že vykazuje teplotní ztráty rozhraním a je vyhříván konkrétními zdroji, např. elektrodami 10 nebo hořáky 11 v takové sestavě a rozložení dodávané energie, že se uvnitř prostoru vytvoří teplotní pole, které vyvolá požadovaný

15 spirálovitý typ proudění skloviny 6, charakterizovaný vysokým využitím tavicího prostoru a odpovídající charakteru proudění v modelovém zařízení. Tohoto cíle se dosáhne návrhem prvního uspořádání tavicího prostoru, vycházejícího z poznatků na původním modelovém zařízení matematickým modelováním teplotního a rychlostního pole taveniny skla a průběhu rozpouštění pískových zrn na trajektoriích skloviny vytvořených vloženou energií do

20 uspořádaných zdrojů tepla a ztrátami v navržené variantě. Výkon tohoto uspořádání se po prvním výpočtu upravuje tak, aby se při předem definované a dodržované průměrné teplotě v tavicím prostoru poslední zrna sklářského písku rozpustilo právě na výstupu 13 z tavicího prostoru, tj., aby tento prostor pracoval bez tavicí rezervy. Tento stav je nazván kritickým.

Výpočtem se získají *doba rozpouštění pískových zrn na nejnevýhodnější kritické dráze*, τ_{Dcrit} prostorem (zrno se rozpustí právě na výstupu z prostoru a daná trajektorie určí

25 *maximální tavicí výkon* $\dot{V}$ vycházející z kritického stavu) a příslušná *geometrická doba zdržení* $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$, *doby rozpouštění písku na ostatních sledovaných trajektoriích* τ_D (jichž je 10^5 a více) i jejich *střední hodnota* $\bar{\tau}_D$ doby rozpouštění částic sklářského písku, a z distribuce dob zdržení skloviny na sledovaných trajektoriích její *střední doba zdržení* $\bar{\tau}$ v prostoru při

30 kritickém nastavení. Pomocí rovnice (4) je pak získáno příslušné *využití prostoru* u_D a dále je z údajů o výkonu a spotřebované energii vypočtena specifická spotřeba energie na tepelné ztráty.

První uspořádání může být, ale nutně být nemusí, referenční a simuluje uspořádání odpovídající běžně klasicky otápěnému zařízení, které vykazuje nízkou hodnotu využití prostoru. Výsledky výpočtů při očekávaném výhodném typu proudění s vysokým využitím tavicího prostoru (dále prostoru) se pak srovnávají s referenčními a z jejich porovnání vycházejí upravené další varianty. Jak bylo již zmíněno, není třeba vždy provádět výpočet referenčního nastavení a při hledání optimálního spirálovitého proudění je v dalších výpočtech možno vycházet pouze ze získaných hodnot využití prostoru, kde dobré hodnoty začínají zhruba kolem 0,4. Cílem je pak dostat se k co nejvyšší hodnotě u_D využití tavicího prostoru zhruba mezi 0,6 až 0,8.

- 10 Druhé uspořádání vychází rovněž z výsledků modelování na tavicím prostoru s předem nastavenými teplotními okrajovými podmínkami, nastavuje se však již takové umístění i dimenzování zvolených zdrojů tepla, případně dimenzování izolace rozhraní, aby se lépe dosáhlo popsaného výhodného typu spirálovitého proudění. V první variantě se podle již uvedeného postupu vypočte využití tavicího prostoru v této variantě, výkon prostoru a specifická spotřeba energie a případně se porovná s referenčními hodnotami prvního uspořádání. Podle výsledků se upraví uspořádání zdrojů, případně izolace a rozložení dodávané energie směrem, ve kterém se očekává zvýšení využití. Směr úpravy se určuje pomocí již získaných obecných zákonitostí, kterými se řídí využití tavicího prostoru. V druhé variantě se získá druhá sada využití, měrné spotřeby energie a výkonu. V navrhování zlepšených variant se případně pokračuje do dosažení nejvyšší dosažitelné hodnoty využití prostoru.

Postup vedoucí k návrhu tavicího prostoru s vysokým využitím se tedy rozpadá do těchto kroků:

1. Zjištění závislosti doby rozpuštění pískových zrn na teplotě v laboratoři a stanovení teplotní závislosti průměrné rychlosti rozpouštění na teplotě.
2. Návrh základních dimenzí a způsobu otopu nového tavicího prostoru s využitím běžných konstrukčních znalostí a výsledků z původního modelového prostoru na základě požadavků na výkon a při dodržení nutných podmínek tavení (průměrné teploty).
3. Výpočet využití tavicího prostoru při referenčním uspořádání odpovídajícím podmínkám v klasicky provozovaném zařízení. Tento krok není nevyhnutelný.
4. Výpočet využití v tavicím prostoru s navrženými parametry odpovídajícími očekávanému žádoucímu typu spirálovitého proudění.
5. Opakované úpravy podmínek a výpočet vedoucí k uspořádání a podmínkám,

při nichž se dosáhne nejvyššího využití tavicího prostoru a jemu odpovídajících hodnot tavicího výkonu a měrných ztrát z hlediska teoretického i praktického.

Speciální tavicí prostor pro rozpouštění zrn sklářského písku v plochém skle typu float pracující při průměrné teplotě 1400 °C a s požadovaným výkonem alespoň 20t/24h. Vzhledem ke zjišťovaným vysokým specifickým výkonům získávaným na předchozím modelovém prostoru s nastavenými teplotami byl navržen poměrně malý tavicí prostor tvaru kvádru s délkou 2m, šířkou 1m a výškou hladiny skloviny 6 0,5m. Podrobné schéma tohoto prostoru je na obrázku 6. Tavicímu prostoru předchází prostor pro vytvoření skloviny, který není předmětem tohoto vynálezu. Stěny tavicího prostoru jsou složeny z vrstev žárovzodorného materiálu, klenba 5 je nízká, mírně zaklenutá. Vstup 12 je umístěn v celé šířce tavicího prostoru buď u dna 1, nebo u hladiny skloviny 6 a zabírá 20% čelní zakládací stěny 2. Výstup 13 je pak tvořen průtokem u hladiny skloviny 6 v celé šířce tavicího prostoru, jehož plocha představuje rovněž 20% zadní průtokové stěny. Tavicí prostor je otápěn podélnou řadou 6 molybdenových elektrod 10 umístěných ze dna 1 v ose tavicího prostoru. Elektrody 10 jsou zapojeny způsobem, kdy řada elektrod je rozdělena na tři dvojice, přičemž každé dvojici připadá jeden transformátor. Tím je umožněno rozdělit výkon elektrod do třech zón a nastavit tak požadovaný výkonový, a tedy i teplotní gradient. Způsob umožňuje regulovat přívod energie do skloviny v jednotlivých částech pece a tak upravovat charakter a intenzitu přirozeného proudění v tavicím prostoru.

Obrázek 6 představuje podrobné schéma navrženého prostoru pro tavení plochého skla s horním vstupem 12. V první fázi modelování bylo nastaveno takové rozložení energie na elektrodách 10, které simulovalo typ proudění obvyklý v klasických sklářských pecích (referenční nastavení). Vstup 12 do tavicího prostoru byl u hladiny skloviny 6. Soustředěním energie na elektrodu č. 5 a 6 byla simulována příčná tepelná bariéra, která vyvolává obvyklé podélné cirkulační proudění. Rozložení energie na elektrody v % je udáno v tabulce 1.

Tabulka 1

Rozložení energie na elektrodách 10 podle jejich číslování v obrázku 6 při referenčním nastavení ohřevu a s horním vstupem 12.

Elektrody	1+2	3+4	5+6
Výkon [kW]	0	0	118,6

Charakter proudění byl kontrolován, aby odpovídal charakteru známému z klasických sklářských tavicích pecí.

Na obrázku 7 je výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné úseky trajektorií skloviny uraženými za 30 s, představujícím referenční
5 případ.

Byly rovněž získány průměty kritické a dalších nevýhodných trajektorií pro rozpouštění, jejichž průměty do podélného osového vertikálního řezu tavicím prostorem jsou uvedeny v obrázku 8, který znázorňuje referenční případ.

Výsledné rozložení rychlostí a tvary trajektorií odpovídají výsledkům získávaným na
10 klasických zařízeních, referenční případ je tedy kvalitativně správně nastavený.

Pro rozpouštění písku byla získána experimentální data opakovanými laboratorními tavbami skel a počítáním nerozpuštěných zrn písku ve výsledných vzorcích skel získávaných v časové posloupnosti při teplotách 1300 až 1500 °C a v intervalech po 50 °C. Pro průměrnou rychlost rozpouštění pískových zrn počátečního maximálního průměru zrna 0,5 mm byla
15 získána empirická rovnice [36]: $v_{Diss} = 1.56 \times 10^{-18} \exp(0.0153T)$ [ms^{-1}], kde T je teplota v K. Tato rovnice byla aplikována na rozpouštěcí proces probíhající v tavicím prostoru s teplotami a prouděním nastavenými na referenční případ a později i na další případy.

Modelováním konečné varianty vystihující klasické nastavení, vyhovující průměrné teplotě 1400 °C a zpracováním byly získány tyto hodnoty:

20 Průměrná teplota: 1400 °C.

Rozměry tavicího prostoru 2x1x0,5 m – délka, šířka, výška.

Vstup 12: Horní.

Výkon elektrického ohřevu E : 118,6 kW.

Kritický výkon $\dot{V}$: $6.79 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 13.65 \text{ t}/24\text{h} = 6.82 \text{ t}/(24\text{hm}^2)$.

25 Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: 13 888 s.

Průměrná doba rozpuštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 2451 s.

Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 14724 s.

Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0.050.

Podíl mrtvého prostoru po rozpuštění zrn písku m_D : 0.825.

30 Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0.166.

Měrné ztráty $H^L = \frac{E \tau_G}{V \rho}$: 751 kJ/kg.

Zjištěný referenční měrný výkon tavicího modulu $6.82 \text{ t}/(24\text{h}\text{m}^2)$ je vysoký v porovnání s měrnými výkony běžných sklářských pecí, je však třeba vzít v úvahu, že v daném případě je nastavená průměrná teplota 1400°C poměrně vysoká, jedná se o nejvyšší možný výkon – kritický - kdy v prostoru není k dispozici žádná tavicí rezerva a že se daný výkon týká pouze dokončení rozpouštění pískových zrn. S 50% rezervou činí měrný výkon již pouze $3,41 \text{ t}/(24\text{h}\text{m}^2)$ a tato hodnota je již realistická. Stejná situace platí pro měrné ztráty, které by při 50% rezervě činily 1502 kJ/kg , což je vzhledem k vysoké průměrné tavicí teplotě 1400°C rovněž realistická hodnota.

Zjištěný podíl mrtvého prostoru m_G je při daném typu proudění mnohem nižší, než se očekávalo a bývá zjišťováno např. měřením přechodové charakteristiky pece. Kontrola křivky distribuce dob zdržení skloviny v peci však neodhalila nepravidelnosti na této křivce, které by mohly odhalit recyklaci některých průběžných trajektorií z důvodu numerických chyb výpočtu (zvyšuje se pak hodnota $\bar{\tau}$ a klesá vypočtená hodnota m_G). Důvodem pro nízké hodnoty mrtvého prostoru m_G je fakt, že příčná teplotní bariéra byla nastavována pouze výkonem na osově umístěných elektrodách 10. To již vyvolalo určitý podíl příčného proudění a důsledkem bylo snížení hodnoty m_G . Při vytvoření klasické příčné teplotní bariéry by bylo využití tavicího prostoru ještě nižší.

Dále bylo provedeno nastavení energie na jednotlivých elektrodách 10 tak, aby se dosáhlo požadovaného typu spirálovitého proudění.

Při konečném nastavení, viz Tabulka 2, lze pozorovat podstatné změny charakteru proudění skloviny a typický spirálovitý charakter kritických a jim blízkých trajektorií skloviny, jak ukazují obrázky 9 a 10. Obrázek 9 ukazuje výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné úseky trajektorií skloviny uraženými za 30s, a představuje optimální případ. Obrázek 10 znázorňuje průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem a představuje optimální případ.

Tabulka 2

Rozložení energie na elektrodách 10 podle jejich číslování v obrázku 6 při optimální variantě nastavení ohřevu a při horním vstupu 12.

Elektrody	1+2	3+4	5+6
Výkon [kW]	33,5	39,4	46,6

Konečná varianta s rozložením výkonů uvedeným v Tabulce 2 poskytla optimální výsledek:

Průměrná teplota: 1400 °C.

Rozměry tavicího prostoru 2x1x0.5 m- délka, šířka, výška.

5 Vstup 12: Horní.

Výkon elektrického ohřevu E : 119,5 kW.

Průměrný příčný teplotní gradient 45 K/m, průměrný podélný gradient 8K/m, průměrný podíl příčného ku podélnému gradientu 5,6.

Kritický výkon $\dot{V}$: $2.63 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 52,86 \text{ t}/24\text{h} = 26,43 \text{ t}/(24\text{hm}^2)$.

10 Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: 3760 s.

Průměrná doba rozpuštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 2498 s.

Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 3807 s.

Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0,012.

Podíl mrtvého prostoru po rozpuštění zrn písku m_D : 0,336.

15 Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0,656.

Měrné ztráty $H^L = \frac{E \tau_G}{V \rho}$: 196 kJ/kg.

Tento výsledek již ukazuje podstatné zlepšení z důvodu nastavení účinnějšího typu proudění v tavicím prostoru. Využití tavicího prostoru u_D se oproti referenčnímu případu 20 zvýšilo 3,95x, tavicí výkon prostoru se zvýšil 3,87x a měrné ztráty poklesly 3,83x. Při uvažování 50% tavicí rezervy by výkon prostoru činil 26,43 t/24h a měrný rozpouštěcí výkon by činil 13,22 t/(24hm²). Podmínky na požadovaný výkon tavicího prostoru byly splněny.

Při provozování zařízení s optimalizovaným prouděním skloviny vyvstane problém spočívající v občasné úniku neprotavené vsázky z hladiny předchozího prostoru horním 25 vtokem do rozpouštěcího prostoru. Tento problém byl řešen umístěním vstupu 12 do oblasti u dna 1 rozpouštěcího prostoru, jak ukazuje obrázek 11. Obrázek 11 znázorňuje podrobné schéma navrženého prostoru pro tavení plochého skla s dolním vstupem.

U tohoto případu bude demonstrováno dosažení optimálního nastavení proudění pomocí 30 dvou variant, varianty první a poslední - optimální. Při prvním nastavení se vyšlo z výsledků získaných na původním modelovém zařízení s nastaveným teplotním polem [33-34]. V první variantě byl nastaven na všechny elektrody 10 prakticky stejný výkon, jak ukazuje Tabulka 3.

Tabulka 3

Rozložení energie na elektrodách 10 podle jejich číslování v obrázku 11 při první variantě nastavení ohřevu a při horním vstupu 12.

Elektrody	1+2	3+4	5+6
Výkon [kW]	40,6	40,6	41,8

- 5 Výsledky výpočtu první varianty jsou tyto:
 Průměrná teplota: 1400 °C.
 Rozměry tavicího prostoru 2x1x0.5 m - délka, šířka, výška.
 Vstup 12: Dolní.
 Výkon elektrického ohřevu E : 122,9 kW.
- 10 Průměrný příčný teplotní gradient 40 K/m, průměrný podélný gradient 8K/m, průměrný podíl příčného ku podélnému gradientu 5.
 Kritický výkon $\dot{V}$: $2,49 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 50,11 \text{ t}/24\text{h} = 25,05 \text{ t}/(24\text{hm}^2)$
 Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: 3988 s.
 Průměrná doba rozpuštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 2531 s.
- 15 Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 4011 s.
 Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0,006.
 Podíl mrtvého prostoru po rozpuštění zrn písku m_D : 0,365.
 Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0,631.
 Měrné ztráty $H^L = \frac{E\tau_G}{V\rho}$: 212 kJ/kg.
- 20 Charakter proudění se změnou umístění vstupu 12 se nezměnil. Modelování pokračovalo do dosažení optimálního případu.
 Optimální případ je znázorněn pomocí Tabulky 4 a obrázků 12 a 13. Obrázek 12 ukazuje výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné úseky trajektorií skloviny ураženými za 30 s, jakožto optimální případ. Obrázek 13 znázorňuje průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem, což představuje optimální případ.
- 25 Nastavení toku energií v optimálním případě je v Tabulce 4.

Tabulka 4

Rozložení energie na elektrodách 10 podle jejich číslování v obrázku 6 při nastavení optimálního ohřevu a při vstupu 12 u dna 1.

Elektrody	1+2	3+4	5+6
Výkon [kW]	34,8	41,0	48,4

- 5 Výsledky výpočtu poslední – optimální - varianty jsou tyto:
 Průměrná teplota: 1400 °C.
 Rozměry tavicího prostoru 2x1x0.5 m – délka, šířka, výška.
 Vstup 12: Dolní.
 Výkon elektrického ohřevu E : 124,2 kW.
- 10 Průměrný příčný teplotní gradient 45 K/m, průměrný podélný gradient 7K/m, průměrný podíl příčného ku podélnému gradientu 6,4.
 Kritický výkon $\dot{V}$: $2,54 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 51,05 \text{ t}/24\text{h} = 25,53 \text{ t}/(24\text{hm}^2)$.
 Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: 3915 s.
 Průměrná doba rozpuštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 2545 s.
- 15 Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\bar{V}}$: 3943 s.
 Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0,007.
 Podíl mrtvého prostoru po rozpuštění zrn písku m_D : 0,350.
 Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0,646.
 Měrné ztráty $H^L = \frac{E \tau_G}{V \rho}$: 210 kJ/kg.
- 20 Porovnání první a optimální varianty ukazuje, že již první předpokládaná varianta se málo liší od varianty optimální. Výsledky jsou tedy málo citlivé na malé změny, pokud existuje podložená představa o tom, čeho se má dosáhnout.
- Pro porovnání byly použity hodnoty z referenčního případu se vtokem umístěným u hladiny. Podle výpočtu se využití prostoru zvýšilo 3,89x, tavicí výkon se zvýšil 3,74x a měrné ztráty poklesly 3,58x. Výkon při 50% tavicí rezervě by dosáhl 25,53 t/24h a měrný výkon 12,76 t/(24hm²). Hodnoty jsou jen nepatrně horší než u případu se vtokem u hladiny, výkon prostoru přesahuje požadovaných 20t/24h a dané poslední uspořádání může být použito s oběma vstupy.

Příklad 2

(Obr. 14 až 17)

Speciální prostor pro rozpouštění zrn sklářského písku ve skle pro výrobu brýlových výlisků pracující při průměrné teplotě 1300 °C a s požadovaným výkonem alespoň 8t/24h.

- 5 Pro tavení je k dispozici stejný speciální prostor délky 2m, šířky 1m a výšky vrstvy hladiny 0,5m jako v příkladu 1, vstup 12 do tavicího prostoru je umístěn u dna 1 (viz obrázek 11), ohřev je opět elektrický, zdroje tepla však umožňují dosáhnout průměrné teploty pro rozpouštění pouze 1300 °C. Vzhledem k podobnému složení skla a stejným používaným surovinám byla použita stejná závislost doby rozpouštění pískových zrn na teplotě jako v
- 10 příkladu 1. Byl rovněž řešen referenční případ, i když se předpokládalo, že snížení průměrné teploty nebude mít podstatný vliv na využití tavicího prostoru [34]. Výsledná referenční varianta přinesla následující rozložení elektrického výkonu na elektrody 10.

Tabulka 5

- 15 Rozložení energie na elektrodách 10 podle jejich číslování v obrázku 6 při referenčním nastavení ohřevu.

Elektrody	1+2	3+4	5+6
Výkon [kW]	0	0	106,5

- Výsledný typ proudění a průběh kritických a podobných trajektorií se v podstatě neliší od proudění při teplotě 1400 °C při referenčním nastavení, jak ukazují obrázky 14 a 15.
- 20 Obrázek 14 ukazuje výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné úseky trajektorií skloviny uraženými za 30 s, jakožto referenční případ. Obrázek 15 ukazuje průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem, jakožto referenční případ.

Výsledky řešení tohoto referenčního případu jsou následující:

- 25 Průměrná teplota: 1300 °C.
 Rozměry tavicího prostoru 2x1x0,5 m – délka, šířka, výška.
 Vstup 12: Dolní.
 Výkon elektrického ohřevu E : 106,3 kW.
 Kritický výkon $\dot{V}$: $3,78 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 0,76 / 24\text{h} = 0,38 \text{ t} / (24\text{h m}^2)$
- 30 Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: 63206 s.

Průměrná doba rozpuštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 10131 s.

Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\bar{V}}$: 264355 s.

Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0,761.

Podíl mrtvého prostoru po rozpuštění zrn písku m_D : 0,840.

5 Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0,038.

Měrné ztráty $H^L = \frac{E \tau_G}{V \rho}$: 12080 kJ/kg.

Případ je velmi nevýhodný, velkou negativní roli hraje dolní vstup do prostoru. Objevil se již velký podíl mrtvého prostoru m_G , rovněž ztráty jsou mimořádně velké, kritická 10 trajektorie a další se pohybují blízko dna 1 za nízkých teplot, výkon je následně velmi malý. Případ nemůže pro svou krajní nevýhodnost sloužit jako referenční, ukazuje však mimořádný vliv nevhodného typu proudění na efektivitu rozpouštěcího procesu.

V dalším postupu byly nastaveny výkony na elektrodách 10, které v tavicím prostoru vytvoří požadovaný typ optimálního proudění. Rozložení výkonů je uvedeno v Tabulce 6, 15 zatímco rozložení rychlostí a kritická trajektorie spolu s podobnými jsou na obrázcích 16 a 17.

Tabulka 6

Rozložení energie na elektrodách 10 podle jejich číslování v obrázku 6 při optimálním nastavení ohřevu.

Elektrody	1+2	3+4	5+6
Výkon [kW]	29,4	34,7	41,0

20

Obrázek 16 ukazuje výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné úseky trajektorií skloviny uraženými za 30 s, což je optimální případ.

Obrázek 17 ukazuje průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem, což představuje optimální případ.

25 Výsledky řešení optimální varianty jsou tyto:

Průměrná teplota: 1300 °C.

Rozměry tavicího prostoru 2x1x0,5 m –délka, šířka, výška.

Vstup 12: Dolní.

Výkon elektrického ohřevu E : 105,2 kW.

Průměrný příčný teplotní gradient 50 K/m, průměrný podélný gradient 7K/m, průměrný podíl příčného ku podélnému gradientu 7,1.

Kritický výkon $\dot{V}$: $5,59 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 11,23 \text{ t}/24\text{h} = 5,62 \text{ t}/(24\text{hm}^2)$

Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: 17025 s.

- 5 Průměrná doba rozpuštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 10599 s.

Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 17895 s.

Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0.049 s.

Podíl mrtvého prostoru po rozpuštění zrn písku m_D : 0,378.

Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0,592.

- 10 Měrné ztráty $H^L = \frac{E \tau_G}{V \rho}$: 809 kJ/kg.

Výsledné hodnoty splňují předpoklad výkonu, který při předpokládané 25% tavicí rezervě dosáhly hodnoty 8.42 t/24h na celé zařízení, tj. 4,21 t/(24hm²). Měrné ztráty v kJ/kg jsou dle očekávání opět velmi nízké.

15 P ř í k l a d 3

(Obr. 18 až 22)

- Je třeba navrhnout speciální prostor pro rozpouštění sklářského písku v bílé obalové sklovině, který, bude dosahovat výkonu alespoň 300 t/24 h při dosažitelné průměrné tavicí teplotě 1425 °C. Potřebná energie měla být dodávána podle potřeby jak plynovými hořáky 11,
 20 tak elektrodami 10, avšak na uhrazení ztrát se prokázalo dostatečným použít pouze elektrod 10. Pro rozpouštění bude navržen tavicí prostor délky 6,57 m a šířky 2 m při tloušťce vrstvy taveniny skloviny 1 m, o celkový objemu 146 m³. Schéma prostoru s navrženým otopem elektrodami 10 v referenčním i optimalizovaných případech a se vstupem 12 v dolní části vstupního čela je na obrázku 18a (vertikální řez podélnou osou) a 18b (horizontální řez pod
 25 hladinou). Podrobněji, obr. 18a, 18b představuje schéma navrženého tavicího prostoru s otopem elektrodami 10 a umístění elektrod 10 v řezech XZ (a) a XY (b).

Tabulka 7 přináší rozložení energie elektrod 10 podle jejich číslování v obrázku na jejich zdroje v referenčním uspořádání i v prvním optimalizovaném případě.

Tabulka 7

Rozložení energie na elektrodách podle jejich číslování v obrázku 18 při referenční a první optimalizované variantě nastavení ohřevu.

Elektrody	1 - 2	3 - 4	5 - 6	7 - 8	9 - 10	11 - 12	13 - 14	15 - 16	20 - 21	22 - 23	23 - 24	25 - 26
Výkon	Ref.	0	0	0	0	0	0	0	117.7	117.7	117.7	117.7
	Opt.	14.8	19.7	24.6	39.4	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2

- 5 Výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné úseky trajektorií skloviny ураženými za 30 s v referenčním případě je na obrázku 19 a průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem rovněž v referenčním případě jsou na obrázku 20.

- Obrázek 19 představuje výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné úseky trajektorií skloviny ураženými za 30 s, jakožto referenční případ.

- Obrázek 20 ukazuje průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem, jakožto referenční případ.

Výsledky referenčního případu jsou následující:

Průměrná teplota: 1425 °C.

- 15 Vstup 12: Dolní.

Rozměry tavicího prostoru 6,57x2x1,0 m – délka, šířka, výška.

Výkon ohřevů: 471,0 kW.

Kritický výkon $\dot{V}$: $2,20 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 44,1 \text{ t}/24\text{h} = 3,35 \text{ t}/(24\text{hm}^3)$

Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: 36 450 s.

- 20 Průměrná doba rozpouštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 2433 s.

Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 59 875 s.

Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0,391.

Podíl mrtvého prostoru po rozpouštění zrn písku m_D : 0.933.

Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0,041

- 25 Měrné ztráty $H^L = 924$: kJ/kg.

Výsledné hodnoty charakterizují dobře klasickou sklářskou tavicí pec. Poměrně vysoký specifický výkon je opět dán tím, že se jedná o kritický (maximální možný) výkon prostoru a proces zahrnuje pouze rozpouštění pískových zrn.

V dalším postupu bylo na základě minulých výpočtů na modelovém tavicím prostoru a získaných zkušeností navrženo nové rozložení energie dodávané elektrodám 10, které je uvedeno v tabulce 7 pro optimální případ. Cílem bylo opět vyvolat požadované spirálovité proudění skloviny. Výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem znázorněné úseky trajektorií skloviny uraženými za 30 s v prvním optimalizovaném případě je na obrázku 21 a průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem rovněž v prvním optimalizovaném případě jsou na obrázku 22.

10 Výsledky prvního optimalizovaného případu jsou následující:

Průměrná teplota: 1425 °C.

Vstup 12: Dolní.

Rozměry tavicího prostoru 6,57x2x1,0 m – délka, šířka, výška.

Výkon ohřevů: 492,3 kW.

15 Průměrný příčný teplotní gradient 55 K/m, průměrný podélný gradient 10 K/m, průměrný podíl příčného ku podélnému gradientu 5,5.

Kritický výkon $\dot{V}$: $2,97 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 597 \text{ t/24h} = 45,4 \text{ t/(24hm}^3\text{)}$.

Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: 3994 s.

Průměrná doba rozpouštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 1795 s.

20 Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 4419 s.

Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0,096.

Podíl mrtvého prostoru po rozpouštění zrn písku m_D : 0,551.

Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0,406

Měrné ztráty $H^L = 71,2$: kJ/kg.

25

Výsledné hodnoty poskytují neočekávaně vysoký rozpouštěcí výkon tavicího prostoru. To je způsobeno zvýšením využití tavicího prostoru o jeden řád oproti referenčnímu případu. Nižší hodnoty průměrné doby rozpouštění zrn písku ukazují, že rozpouštění v optimalizovaném případě probíhalo i za výhodnějších teplotních podmínek. Důsledkem vysokého výkonu zařízení jsou velmi nízké měrné ztráty. Pokud připustíme asi 16 % tavicí rezervu, daný prostor by poskytoval rozpouštěcí výkon 500 t/24h. Hodnota využití 0,41 však ukazuje, že je možno proudění v prostoru ještě optimalizovat.

30

V dalších krocích bylo pozměněno rozložení tavicího výkonu na elektrodách 10 tak, aby se prodloužila doba setrvání skloviny, která odpovídá kritické trajektorii. Byly vypočteny další dva případy s optimalizovaným rozložením energie na jednotlivé páry elektrod. Druhou variantou bylo dosaženo podstatného zlepšení využití, třetí varianta se od předešlé již lišila velmi málo, využití se tedy blížilo optimální hodnotě. Třetí varianta tak byla vzata za konečnou. Rozložení ve třetí optimalizované variantě je v Tabulce 8.

Tabulka 8

Rozložení energie na elektrodách 10 podle jejich číslování v obrázku 18 při třetí optimalizované variantě nastavení ohřevu.

Elektrody	1 - 2	3 - 4	5 - 6	7 - 8	9 - 10	11 - 12	13 - 14	15 - 16	20 - 21	22 - 23	23 - 24	25 - 26
Výkon	Ref.	0	0	0	0	0	0	0	25	25	25	25
	Opt.	10.0	9	9	8	8	7	7	6	9	9	9

Výsledné rozložení rychlostí v podélném osovém řezu tavicím prostorem a průměty kritické a dalších nejpomalejších trajektorií pro rozpouštění zrn písku do podélného osového vertikálního řezu prostorem jsou velmi podobné prvnímu optimalizovanému případu.

15

Výsledky třetího optimalizovaného případu jsou následující:

Průměrná teplota: 1425 °C.

Vstup 12: Dolní.

Rozměry tavicího prostoru 6,57x2x1,0 m – délka, šířka, výška.

20 Výkon ohřevů: 507 kW.

Průměrný příčný teplotní gradient 55 K/m, průměrný podélný gradient 8 K/m, průměrný podíl příčného ku podélnému gradientu 6,9.

Kritický výkon $\dot{V}$: $4,39 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 881 \text{ t}/24\text{h} = 67 \text{ t}/(24\text{h m}^3)$

Průměrná doba zdržení skloviny v prostoru $\bar{\tau}$: s.

25 Průměrná doba rozpuštění zrn písku $\bar{\tau}_D$: 1782 s.

Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 2994 s.

Podíl mrtvého prostoru cirkulací skloviny m_G : 0,164.

Podíl mrtvého prostoru po rozpuštění zrn písku m_D : 0.288.

Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0.595

Měrné ztráty: $H^L = 49,7 \text{ kJ/kg}$.

Výsledné hodnoty ukazují mimořádně velký výkon a velmi malé měrné ztráty. Navržený prostor s optimalizovaným spirálovitým prouděním má tedy velmi vysokou schopnost rozpustit sklářský písek i po uvažování značné tavicí rezervy. Příklad ukazuje, že
 5 rozpouštění sklářského písku v daném prostoru za daných podmínek se s vysokou pravděpodobností nemůže stát dějem omezujícím intenzitu celého tavicího procesu.

Příklad 4

(Obr. 23 až 24)

10 K dispozici je tavicí prostor, otápné třemi páry příčných hořáků 11 na tavení sodnovápenatého skla a zpracování lisováním na výrobky užitkového skla. Zařízení má v tavicí části délku 6 m a šířku 2 m. Výška hladiny skloviny 6 je 0,6 m. jeho požadovaný výkon se má podstatně zvýšit na hodnotu kolem 30t/24h. Průměrná tavicí teplota se pohybuje kolem 1400 °C. Schéma poloviny původního zařízení je na obrázku 21. Obrázek 21 ukazuje
 15 původní sklářskou tavicí pec v podélném osovém řezu. V původním uspořádání byla energie vytápění rozložena na jednotlivé hořáky 11 podle tabulky 9. Číslování v tabulce jde podle obrázku zleva doprava.

Tabulka 9

20 Rozložení energie na tři páry hořáků 11 podle obrázku 23 zleva doprava při původním nastavení hořáků 11 a referenčním případě je následné:

Výkon prvního páru hořáků 11 : 637 kW.

Výkon druhého páru hořáků 11 : 700 kW.

Výkon třetího páru hořáků 11 : 750 kW.

25 Celkový výkon hořáků: 2087 kW.

Příkon elektrod: 0 kW.

Výsledky referenčního případu jsou následující:

Průměrná teplota: 1400 °C.

30 Vstup 12: Se vsázkou na hladině.

Rozměry: délka 7,2 m celkem, délka tavicí části 5,2 m, šířka 1,65 m, hloubka skloviny 6 je 0,6 m.

Kritický výkon $\dot{V}$: $6.47 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 2.52 \text{ t}/(\text{m}^3 24 \text{ h}) = 13 \text{ t}/24 \text{ h}$.

Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 79598 s.

Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0.059.

Měrná spotřeba energie $H_M^g = \frac{E \tau_G}{V \rho}$: 13866 kJ/kg.

- 5 Výsledné hodnoty ukazují na malé využití prostoru, jemuž odpovídá i malý tavicí výkon zařízení. V současném uspořádání hořáků 11 však nebylo možno podstatněji ovlivnit charakter proudění žádoucím směrem. Proto byla provedena rekonstrukce otápěcího systému spočívající v umístění 14 vertikálních elektrod 10 ze dna 1 v podélné ose tavicího prostoru. Tak byla vytvořena potřebná podélná teplotní bariéra ve skelné tavenině a žádoucí typ
- 10 spirálovitého proudění skloviny. Rozpouštění pískových zrn bylo považováno za kritický proces. Výsledné uspořádání tavicího procesu je uvedeno v obrázku 24 a rozložení energie na hořáky 11 a elektrody v tabulce 10. Novým nastavením bylo dosaženo v oblasti elektrod 10 potřebné příčné spirálovité proudění.
- 15 Obrázek 24 ukazuje uspořádání hořáků 11 v tavicím prostoru v optimalizovaném případě.

Tabulka 10

Rozložení energie na hořáky podle jejich číslování v obrázku 22 v optimalizovaném nastavení hořáků a elektrod.

- 20 Příkon elektrod: 1400 kW (elektrody 1-2 → 308 kW; elektrody 3-4 → 266 kW; elektrody 5-6 → 210 kW; elektrody 7-8 → 168 kW; elektrody 9-10 → 112 kW; elektrody 11-12 → 70 kW; elektrody 13-14 → 70 kW; elektrody 15-18 → 98 kW)
- Výkon hořáků: 16,8 kW

- 25 Výsledky optimalizovaného uspořádání jsou tyto:

Průměrná teplota: 1425 °C

Vstup 12: Se vsázkou na hladině.

Rozměry tavicího prostoru: délka 7,2 m celkem, délka tavicí části 5,2 m, šířka 1,65 m,
hloubka skloviny 0,6 m.

- 30 Výkon ohřevů: 1400 kW na elektrodách 10, 16,8 kW na hořácích 11.

Průměrný příčný teplotní gradient 55 K/m, průměrný podélný gradient 12 K/m, průměrný podíl příčného ku podélnému gradientu 4,6.

Kritický výkon $\dot{V}$: $1.81 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 7,05 \text{ t}/(\text{m}^3 24 \text{ h}) = 36,3 \text{ t}/24 \text{ h}$

Geometrická doba zdržení skloviny $\tau_G = \frac{V}{\dot{V}}$: 28453 s.

Podíl využití tavicího prostoru u_D : 0.239.

Měrná spotřeba energie $H_M^p = \frac{E \tau_G}{V \rho}$: 3335 kJ/kg.

5

Tavicího výkonu 30t/24h lze dosáhnout při daném nastavení v obrázku 24 a tabulce 10 při asi 17% rezervě. Tato reserva není příliš vysoká, ale při ustáleném provozu je dostačující. Specifický tavicí výkon $3.02 \text{ t}/(24 \text{ h m}^2)$ je sice 2,8x vyšší než v případě referenčního nastavení je však poměrně nízký v porovnání s dříve uvedenými případy. Problém je v existenci vrstvy kmene na hladině, která nedovolí plné vyvinutí požadovaného spirálovitého proudění. Pec pracuje ovšem v obou případech neekonomicky z hlediska spotřeby energie, v optimalizovaném případě je možno vyloučit hořáky 11 a pec provozovat jako celoelektrickou.

Ve většině případů uvedených v příkladech bylo dosaženo mimořádně vysokých rozpouštěcích výkonů navrženého prostoru. Výsledky však nelze automaticky vztahovat na celý tavicí proces. Jedná se o uskutečnění pouze jediného tavicího děje, rozpuštění zrn písku, v situaci, kdy tavicí prostor nemá rezervu. Výkon takového speciálního tavicího prostoru může být pak dále snížen, avšak nikoliv podstatně [31], budeme-li uvažovat jako další děj též čerací proces. Nejpodstatněji však může být výkon tavicího prostoru snížen v případě, kdy se ve stejném prostoru uskuteční rovněž konverze vsázky na sklo, což je konečně zřejmé z výsledků v příkladu 4. Jakmile jsou totiž zrušena omezení tavicího výkonu nastolením optimalizovaného proudění skloviny, stane se řídicím dějem celého tavicího procesu právě konverze vsázky a celý rozpouštěcí výkon daného prostoru nebude možno využít, pokud se nezvýší rychlost konverze vsázky. Přesto se dají očekávat měrné tavicí výkony vyšší nebo značně vyšší než $10 \text{ t}/\text{m}^3 \cdot 24 \text{ h}$. Hlavní úsilí je pak třeba věnovat zvýšení kapacity konverze vsázky na sklo.

30

Vztahové značky

	1	dno
	2	zakládací stěna
5	3	zadní průtoková stěna
	4	boční stěny
	5	klenba
	6	sklovina
	7	ponořená příčná přehradní zeď
10	9	příčná řada 9 zdrojů energie
	10	topné elektrody
	11	průmyslové hořáky
	12	vstup
	13	výstup
15		
20		
25		
30		

Literatura

1. Danckwerts, P.V.: Chem. Eng.Sci. **2**, 1 (1953).
2. Cooper, A.R.: J. Am. Ceram. Soc. **42**, 93 (1959).
3. Smrček, J.: Sklář a Ker. **23**, 270, 304 (1973).
- 5 4. Cooper, A. R.: J. Am. Ceram. Soc. **43**, 97 (1960).
5. Moulton, A.: Glass Technol. **23**, (2), 106-112 (1982).
6. Mase, H., Oda, K.: J. Non-Cryst. Solids **38,39**, 807-812 (1980).
7. Layens, G.: Glastechn. Ber. **47**, (11), 251-270 (1974).
8. Carling, J.: Glastechn. Ber. **49**, (12), 269-277 (1976).
- 10 9. Patankar, S.V.: Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Co. McGraw-Hill 1980.
10. Ungan, A., Viskanta, R.: Glastechn. Ber. **60**, (4), 115-124 (1987).
11. Murnane, R.A., Moreland, N.J.: Ceram. Eng. Sci. Proc. **9** (3-4), 192-202 (1988).
- 15 12. Simonis F. De Waal H. and Beerkens R.C.G., XIV Int. Congr. on Glass – Collected Papers Part III (1986), p. 118-127.
13. Ungan, A. Viskanta, R.: Glastechn. Ber. **60**, 71 (1987).
14. Ungan, A., Viskanta, R.: Glass Technol. **28** (6), 252-260 (1987).
15. Choudhary, M.K.: J. Non-Cryst. Solids **101**, 41-53 (1988)
- 20 16. Viskanta, R.; J. Non-Cryst. Solids **177**, 347–362 (1994) .
17. Goldberg, A.J.: Glastechn. Ber. **46** (4), 67-70 (1973).
18. Simonis F., Proceedings of the 2nd Int. Conf. "Advances in the Fusion and Processing of Glass", Glastechn. Ber. **63K**, 1(1990).
19. Ungan, A., Turner, W.H., Viskanta, R.: Glastechn. Ber. **56K**, 125 (1983).
- 25 20. Němec L., Mühlbauer M.: Glastechn. Ber. **56K**, 82 (1983).
21. Beerkens R., Muijsenberg H., van den Heiden T.: Glastechn. Ber. Glass Sci. Technol., **67** (1), 179 (1994).
22. Ungan, A.: Glastechn. Ber. **63K**, 19-28 (1990).
23. Matyas, J., Nemec, L.: Glass Sci. Technol. **76** (2), 71-80 (2003).
- 30 24. Oda, K., Kaminoyama M.: J. Cer. Soc. Japan **117** (6), 736-741(2009).
25. Kasa, S., Lisý, A., Novotný, F.: PV 2011 – 651 (2011).
26. Cooper, A.R.: Collected Papers of the XIV International Congress on Glass (1986), pp.1-8.
27. Consortium on development of innovative glass melting BRIG 2020: The

International Conference of Glass Experts, Brig, March 26-29 (Switzerland).

28. Němec, L., Jebavá, M.: Eur. J. Glass Sci. Technol. A, **47** (3), 68-77 (2006).
29. Němec, L., Jebavá, M., Cincibusová, P.: Ceramics-Silikáty, **50** (3), 140-152 (2006).
- 5 30. Němec, L., Cincibusová, P.: Ceramics-Silikáty, **52** (4), 240-249 (2008).
31. Němec, L., Cincibusová, P.: Ceramics-Silikáty, **53** (3), 145-155 (2009).
32. Polák, M., Němec, L.: Ceramics-Silikaty, **54** (3), 212-218 (2010).
33. Polák, M., Němec, L.: Journal of Non-Crystalline Solids **357** (16-17), 3108-3116 (2011).
- 10 34. Polák, M., Němec, L.: Journal of Non-Crystalline Solids **358** (2012).
35. Cincibusová, P., Němec, L.: Accepted in: Eur. J. Glass Sci. Technol. A, **53** (2012).
36. Polák, M.: Nепublikované výsledky.

15

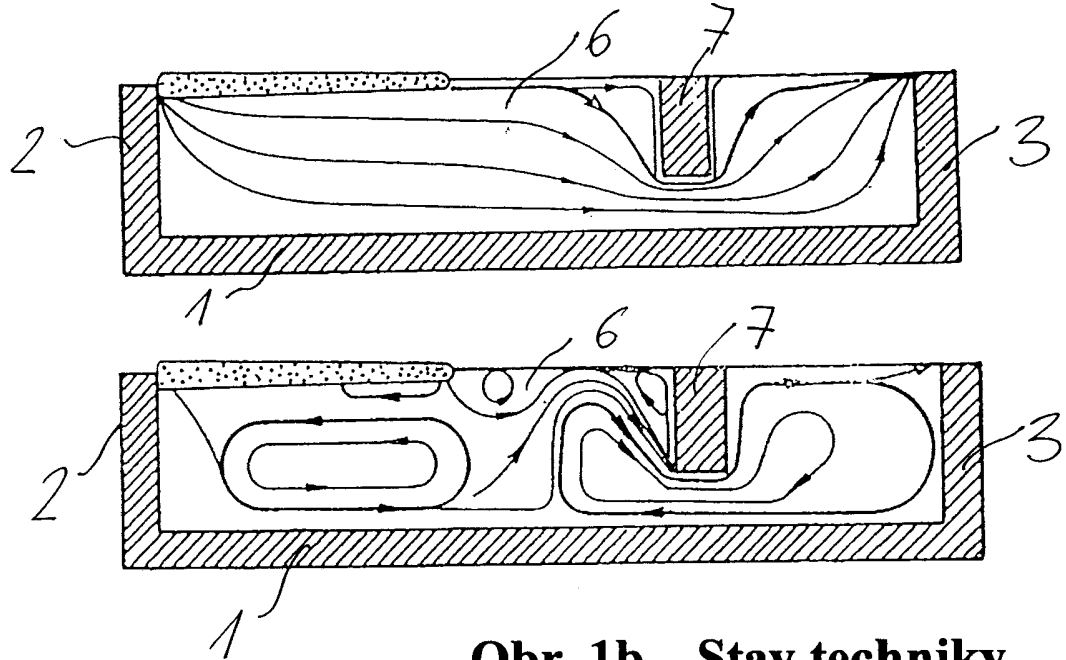
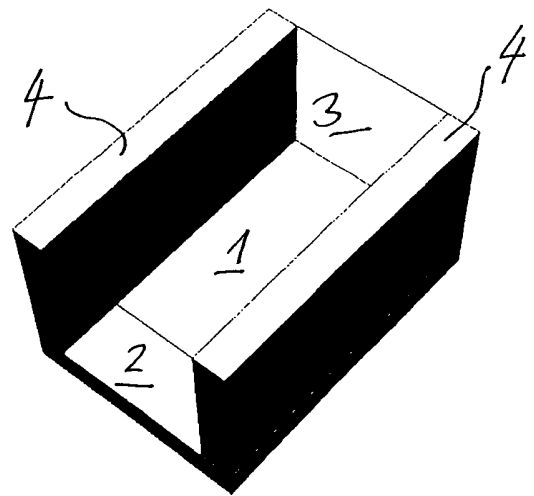
20

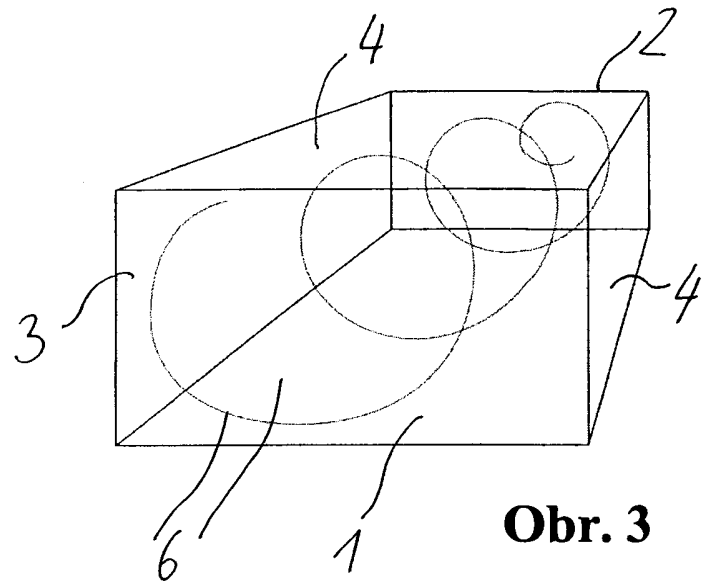
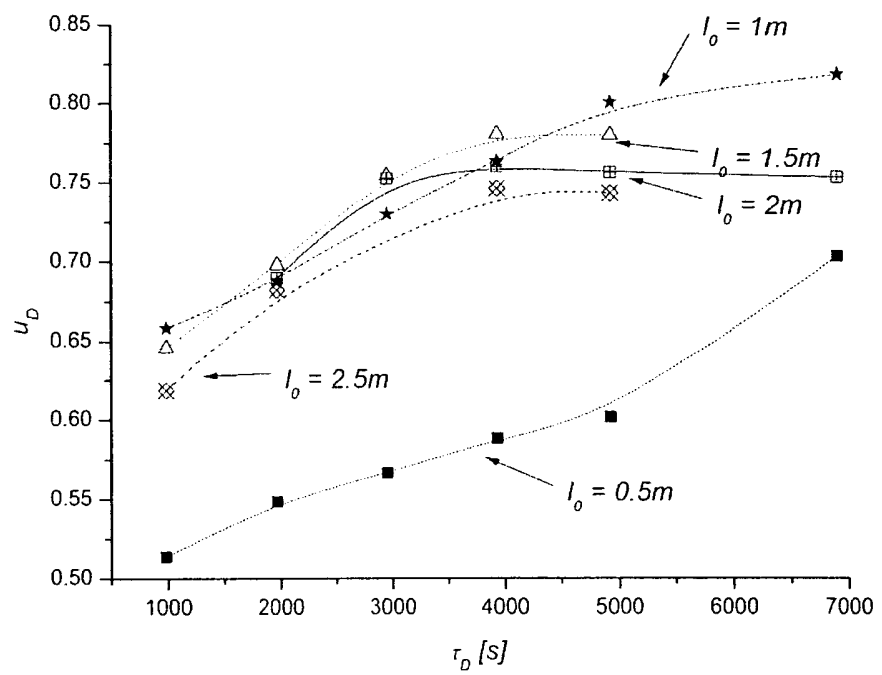
25

30

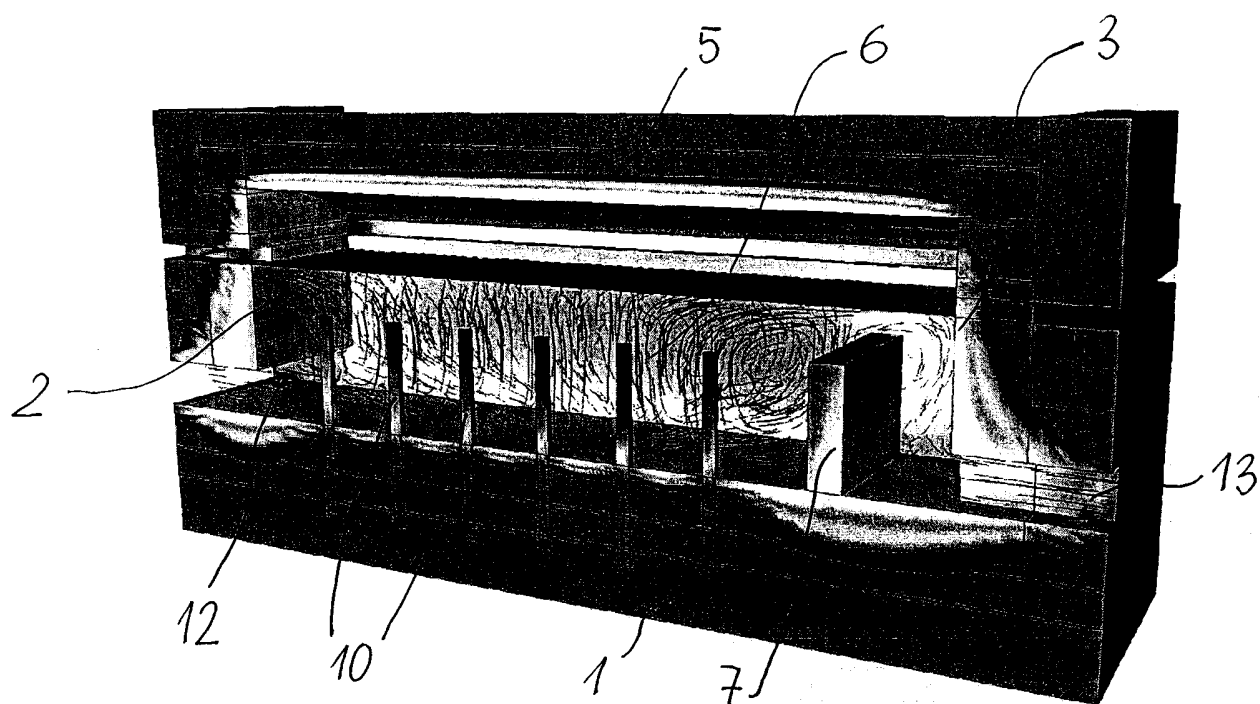
PATENTOVÉ NÁROKY

1. Způsob kontinuální tavení skel řízenou konvekcí skloviny, při němž se působí na roztavené sklo, obsahující nerozpuštěné částice, zejména sklářského písku a nacházející se
5 v horizontálně orientovaném průtočném tavicím prostoru sklářské pece zdroji energie, jako jsou průmyslové sklářské hořáky, topné elektrody a jiné vhodné topné zdroje energie,
vyznačující se tím, že
zdroje energie působí v tavicím prostoru nejméně v jedné řadě v podélné ose tavicího prostoru, nebo paralelně s podélnou osou,
10 a vyvolávají spirálovité proudění skloviny (6) s kruhovým pohybem napříč tavicí částí, které postupuje od čelní zakládací stěny (2) k příčné přehradní zdi (7) ve sklovině (6) případně příčné řadě (9) zdrojů energie,
přičemž příčný teplotní gradient každého spirálovitého proudění je vždy vyšší než jeho podélný teplotní gradient mezi příčnou přehradní zdí (7) ve sklovině (6) případně příčnou
15 řadou (9) zdrojů energie a přivrácenou čelní zakládací stěnou (2).
2. Způsob kontinuálního tavení skel řízenou konvekcí skloviny podle nároku 1,
vyznačující se tím, že poměr příčného teplotního gradientu ku podélnému teplotnímu gradientu je v rozmezí 1 až 30.
20
3. Způsob kontinuálního tavení skel řízenou konvekcí skloviny podle nároku 2,**vyznačující se tím**, že poměr příčného teplotního gradientu ku podélnému teplotnímu gradientu je v rozmezí 5 až 20.
- 25 4. Způsob kontinuálního tavení skel řízenou konvekcí skloviny podle nároku 1 nebo některého z nároků 2 až 3, **vyznačující se tím**, že
spirálovité proudění skloviny prochází tavicím prostorem, jehož využití pro rozpouštění částic, zejména sklářského písku, představuje 0,6 až 0,8 z celkového tavicího prostoru, vymezeného výškou skloviny (6), délkou mezi příčnou přehradní zdí (7) ve sklovině (6)
30 případně příčnou řadou (9) zdrojů energie a přivrácenou zakládací stěnou (2) a šířkou mezi protilehlými bočními stěnami (4).

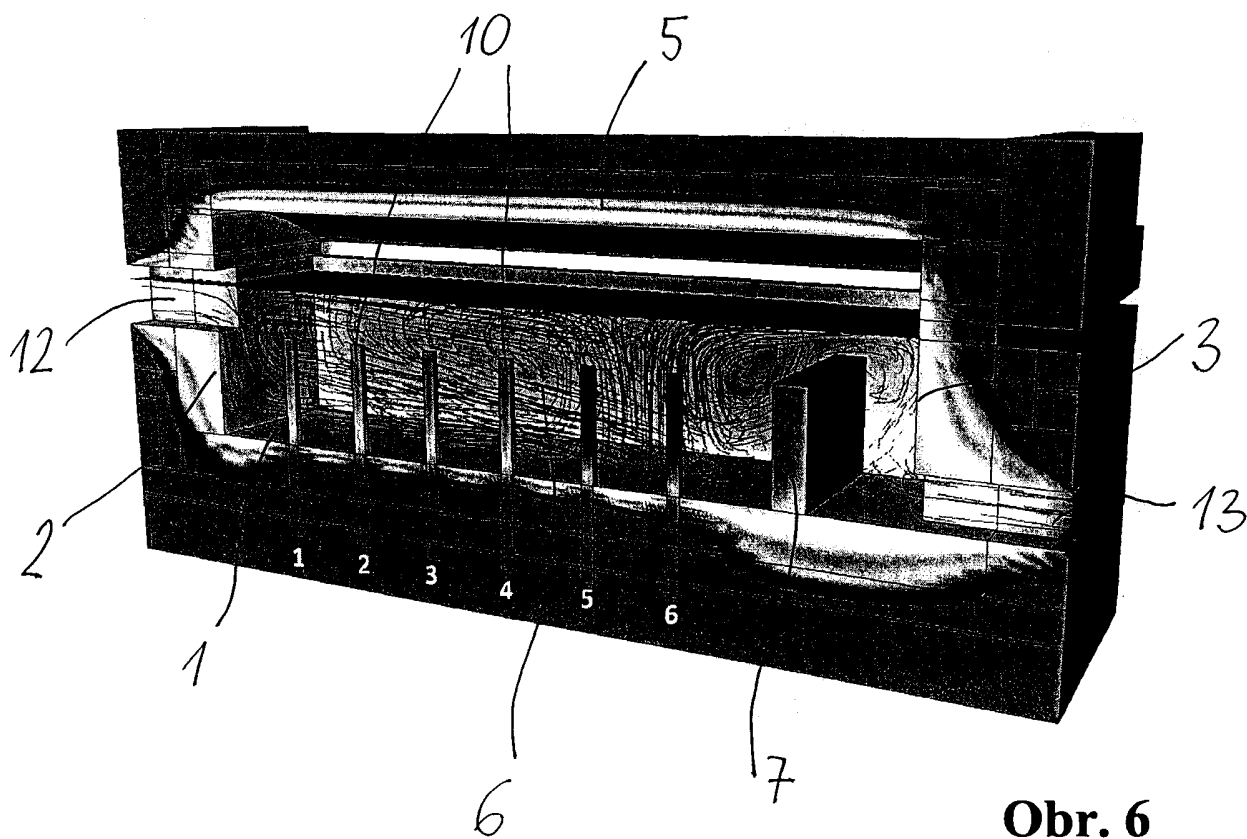
Obr. 1a – Stav techniky**Obr. 1b – Stav techniky****Obr. 2**

**Obr. 3****Obr. 4**

3/11



Obr. 5

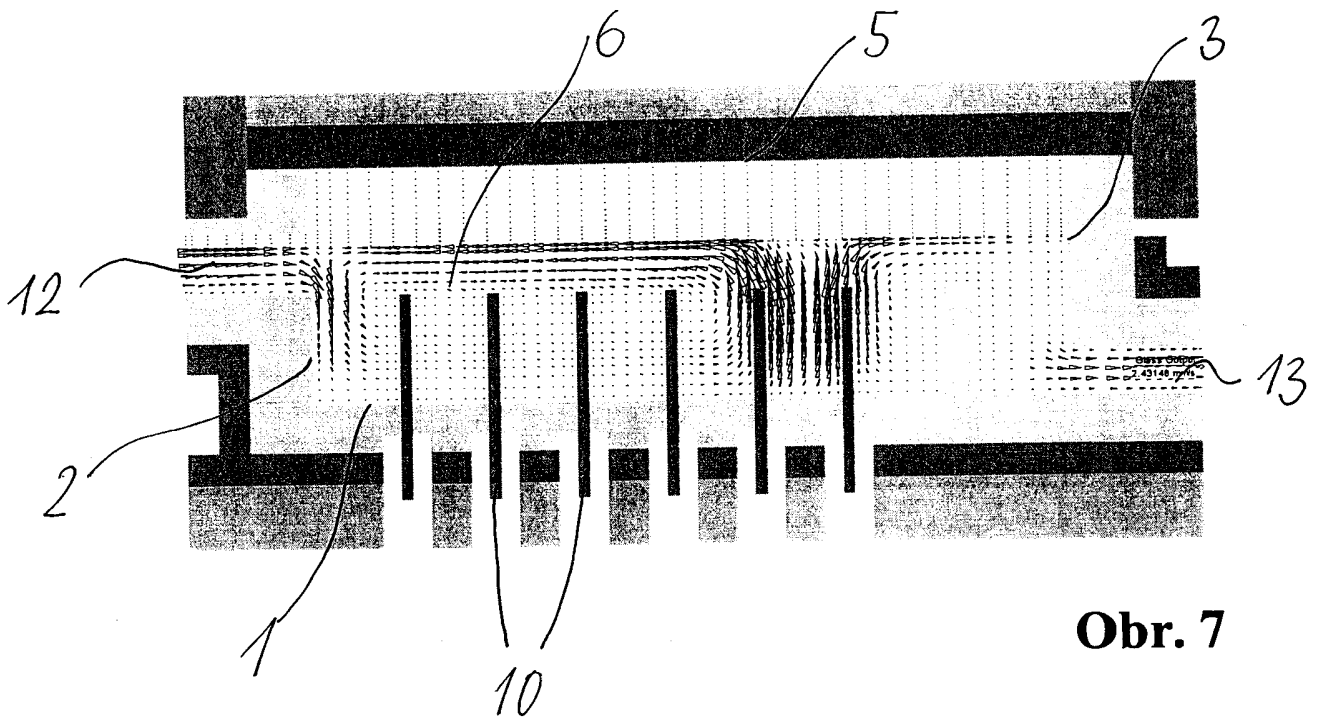


Obr. 6

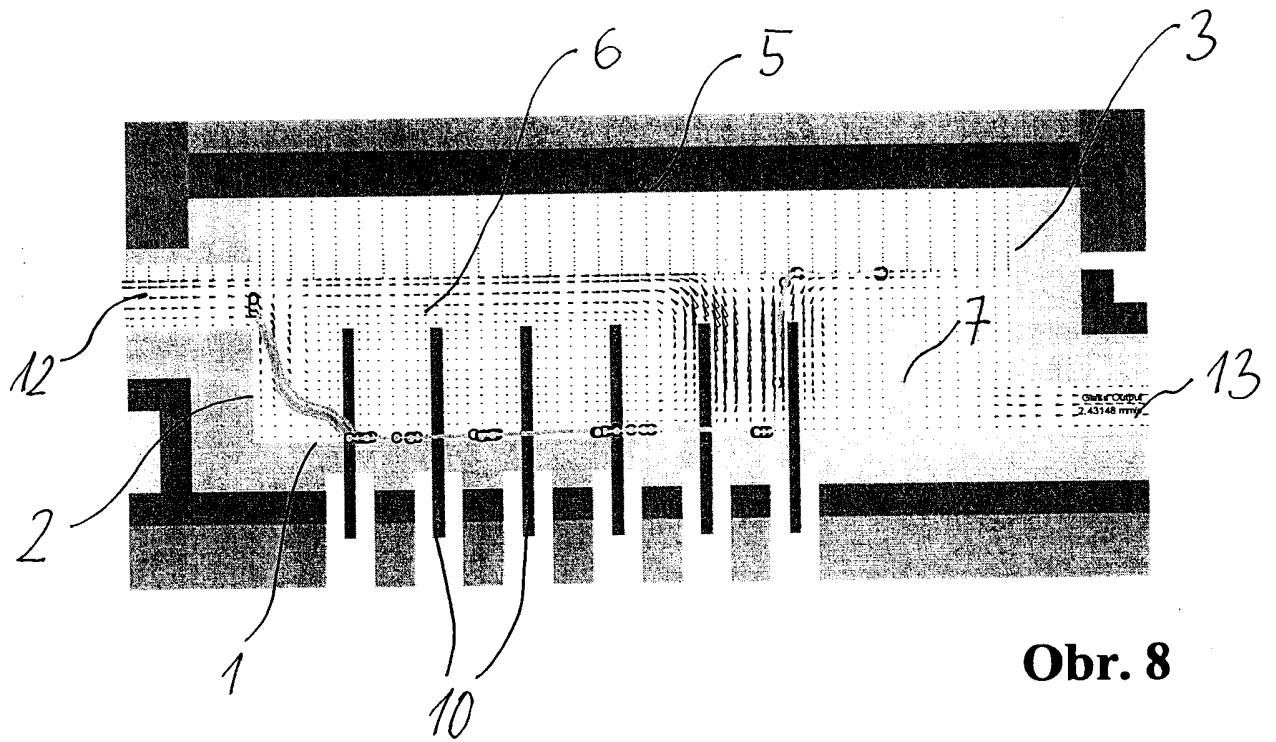
TSC

LO14-605
05.09.12

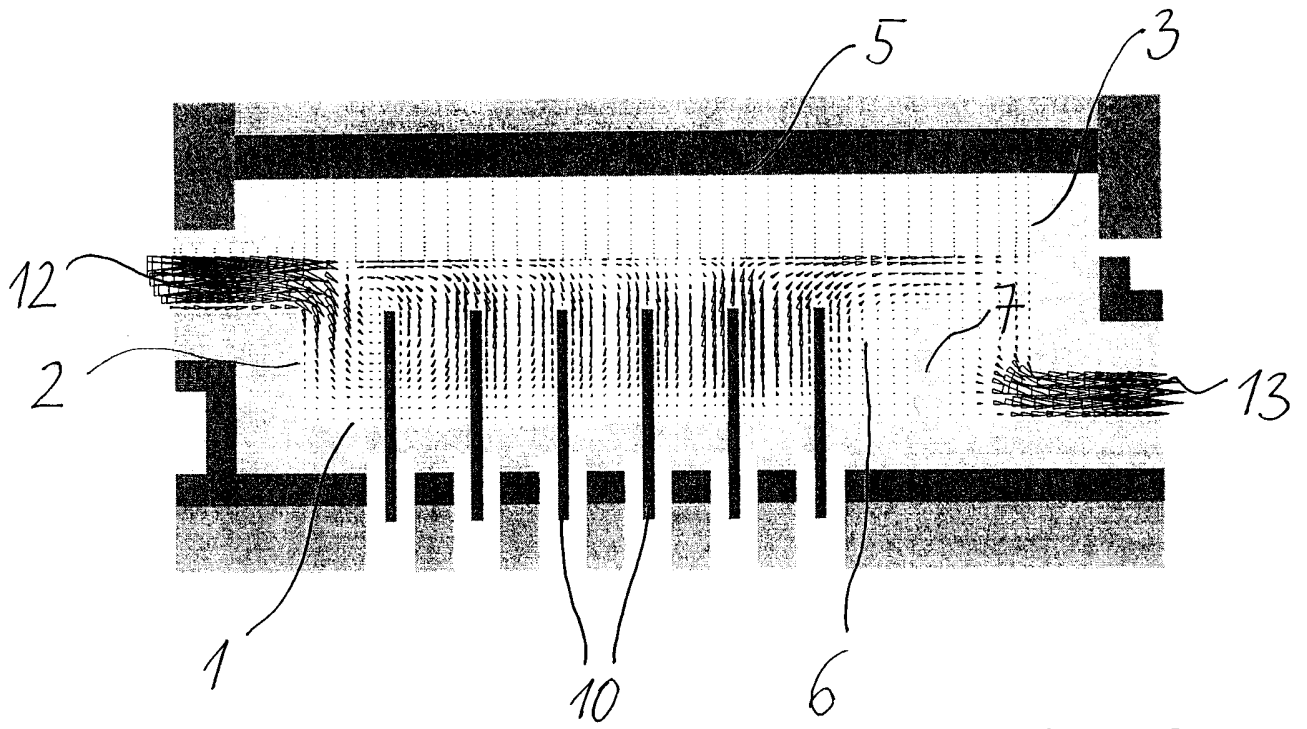
4/11



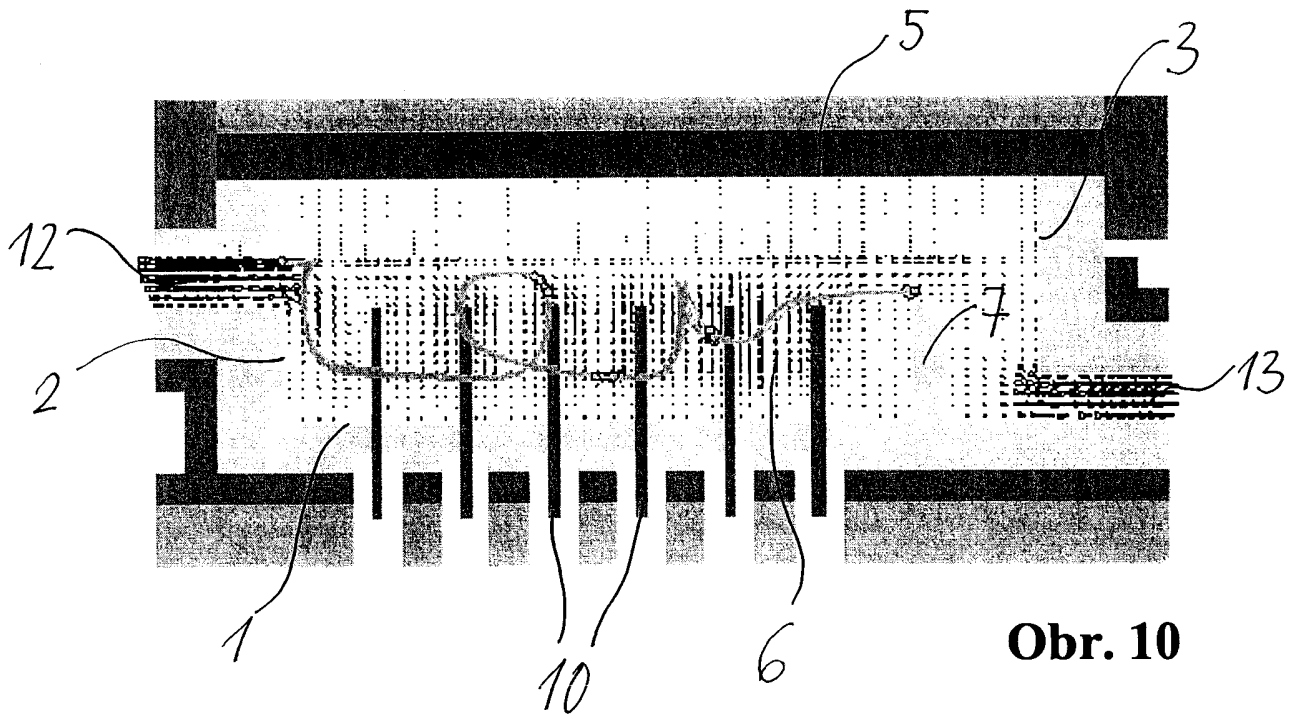
Obr. 7



Obr. 8



Obr. 9

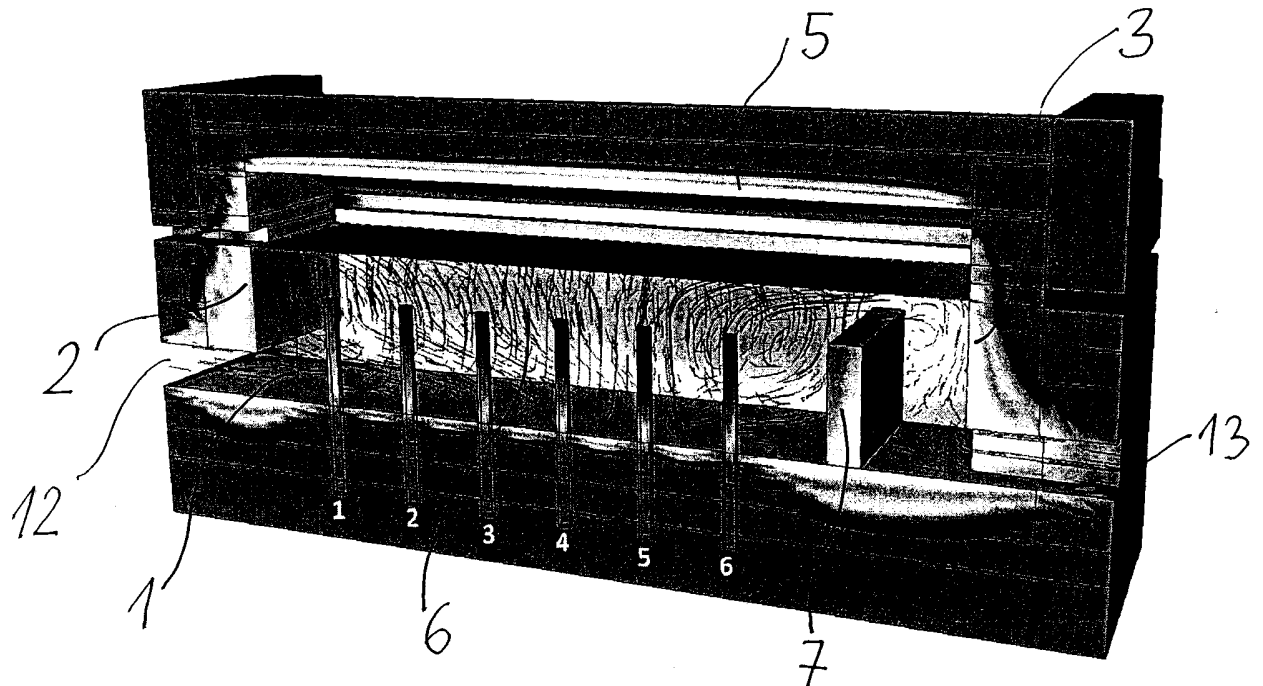


Obr. 10

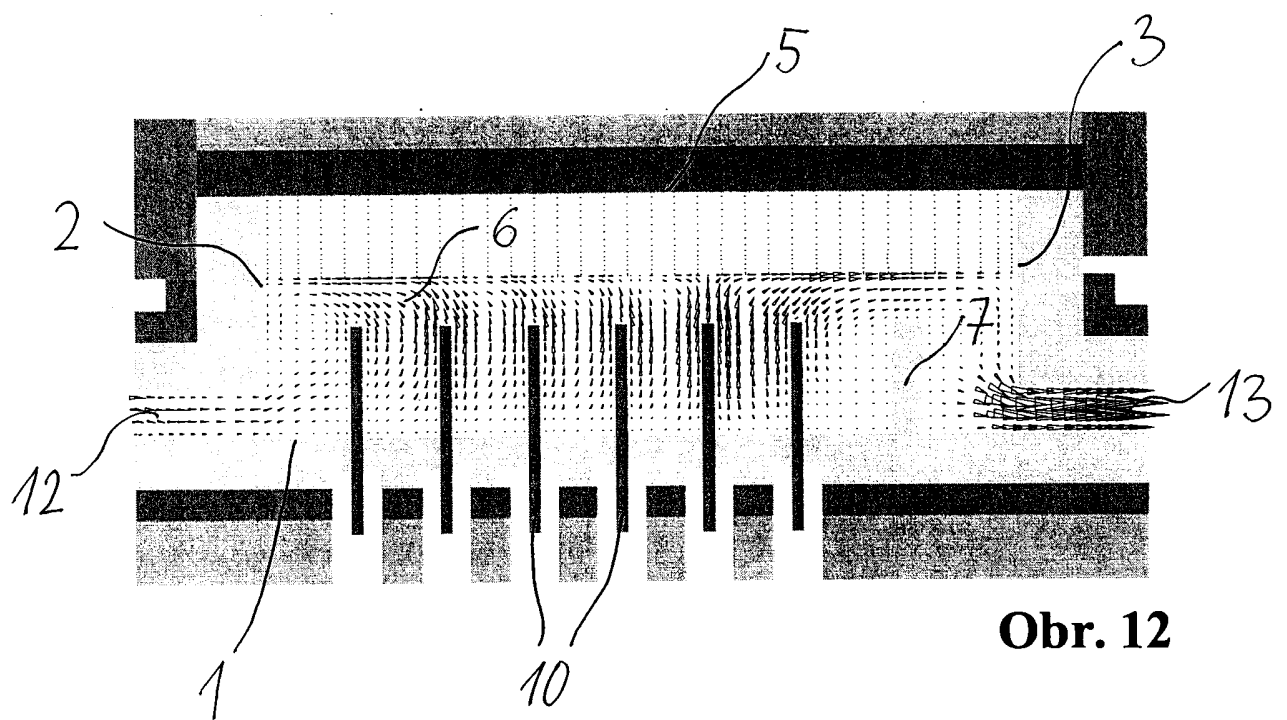
712E

2012-605
05.09.12

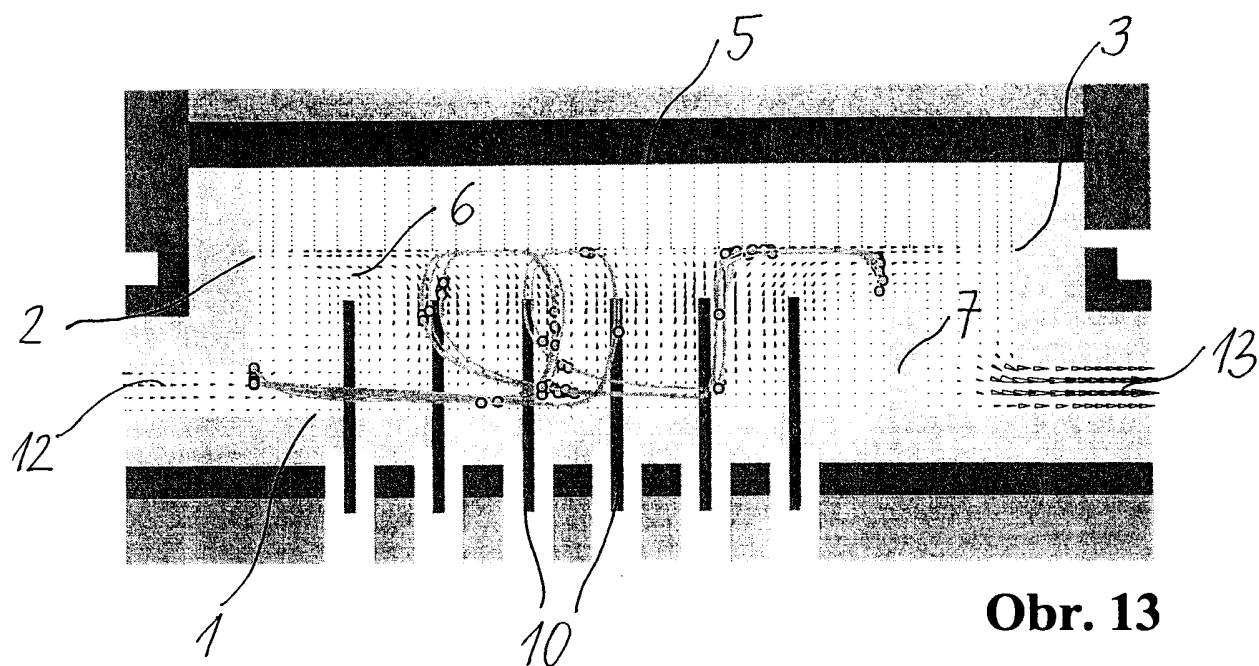
6/11



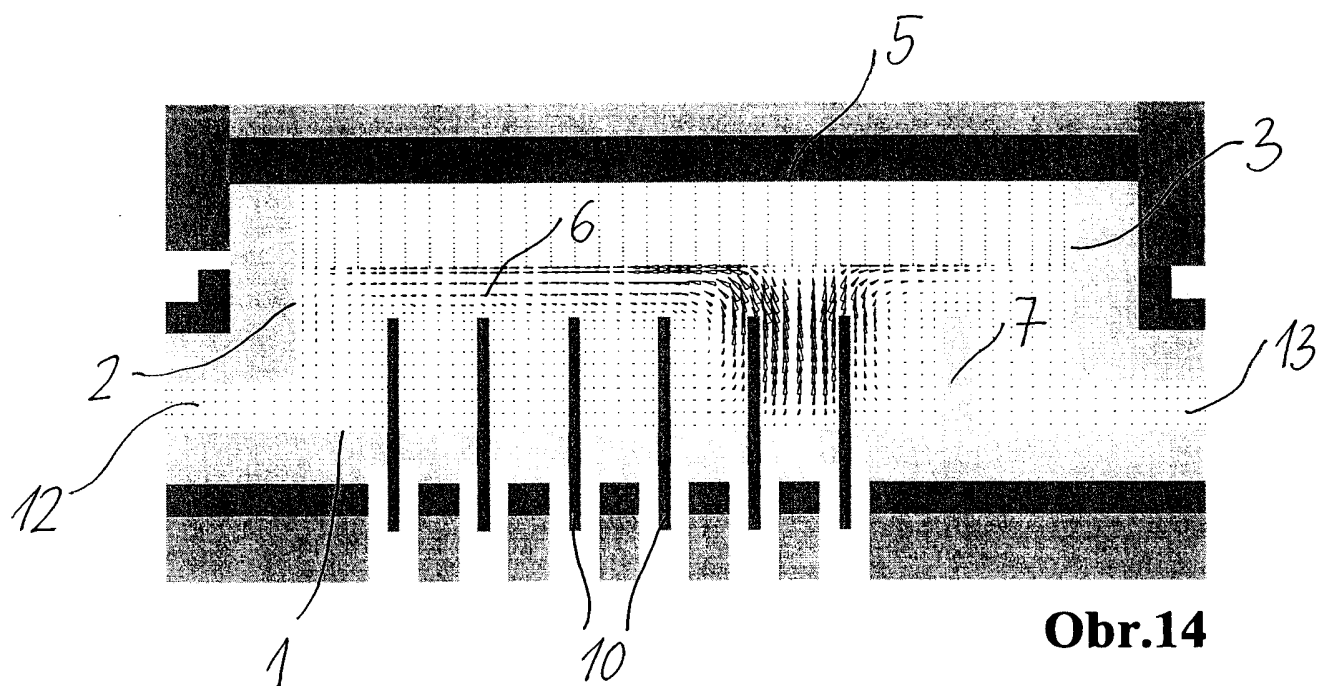
Obr. 11



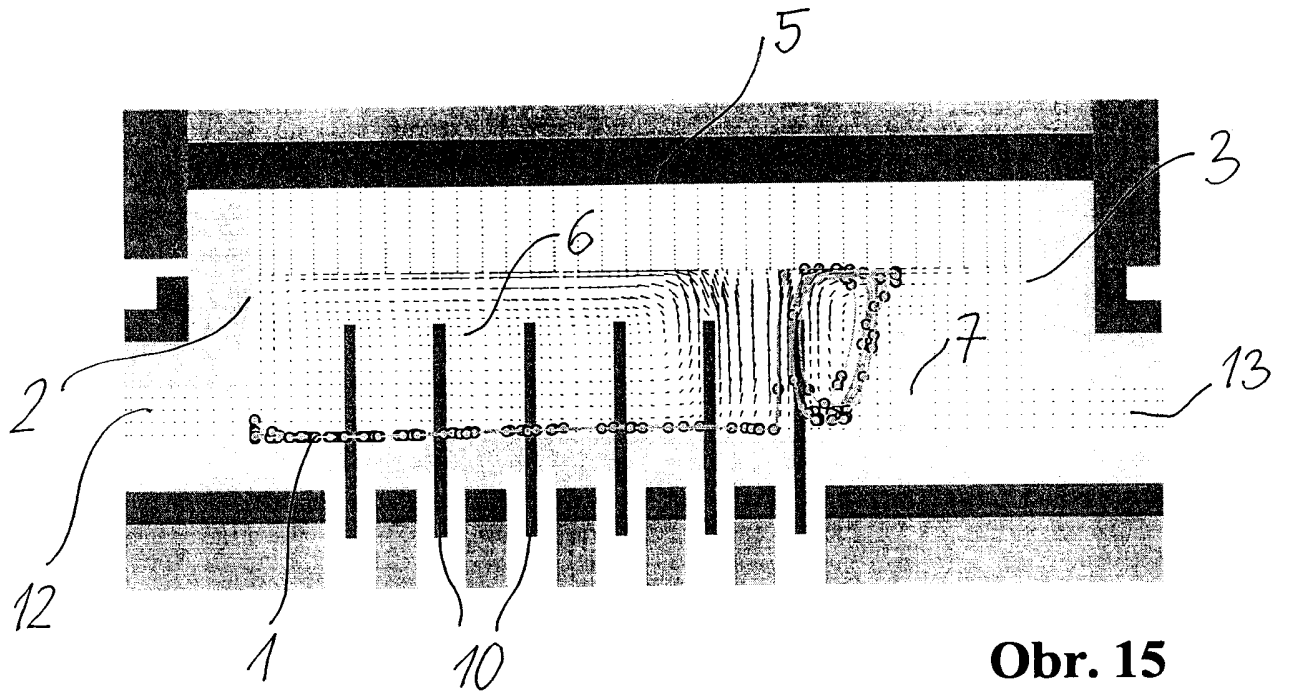
Obr. 12



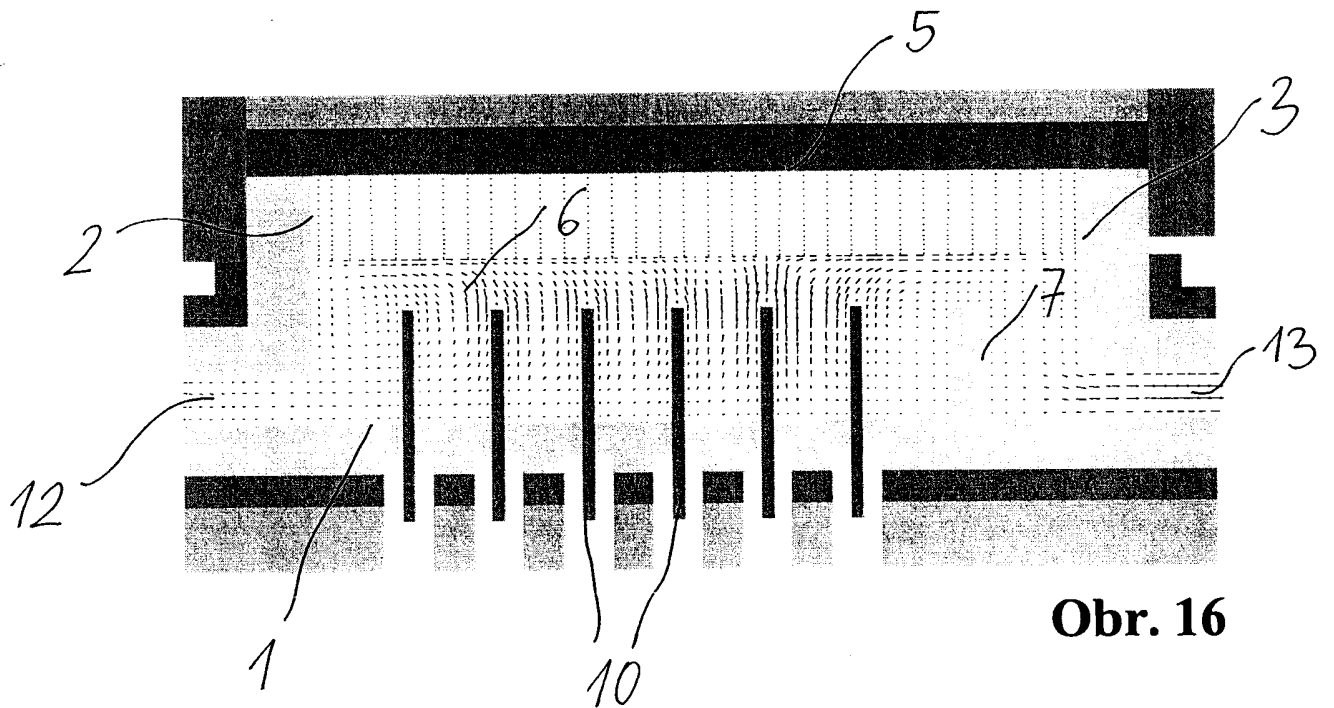
Obr. 13



Obr. 14



Obr. 15



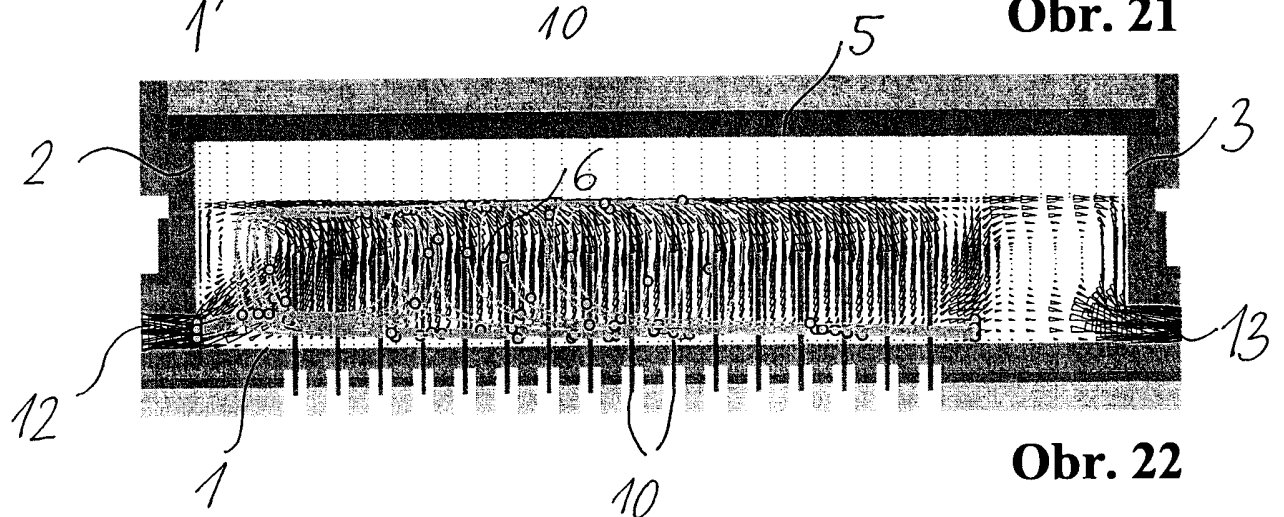
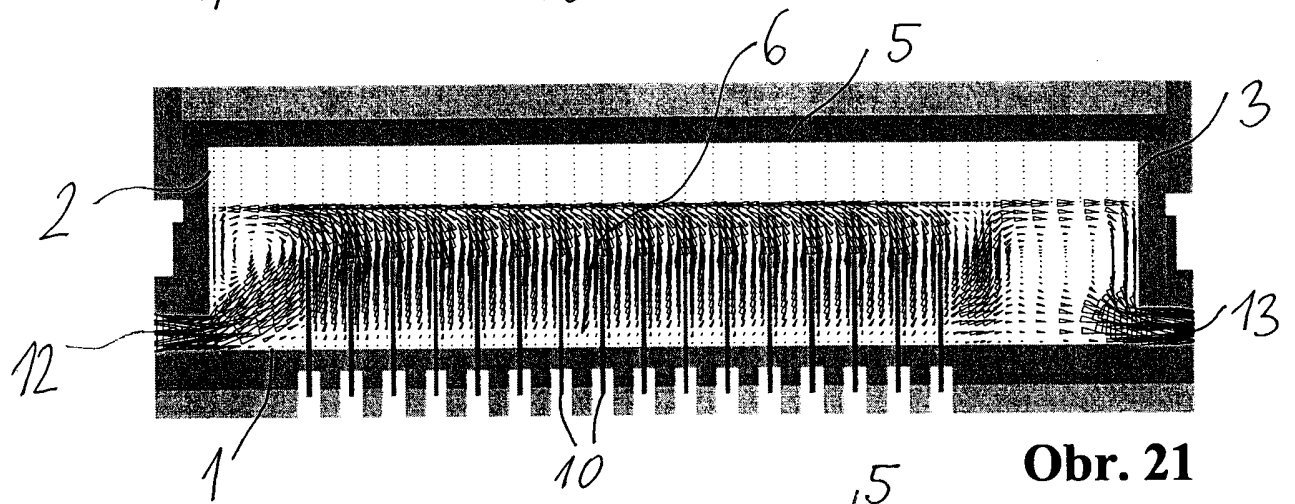
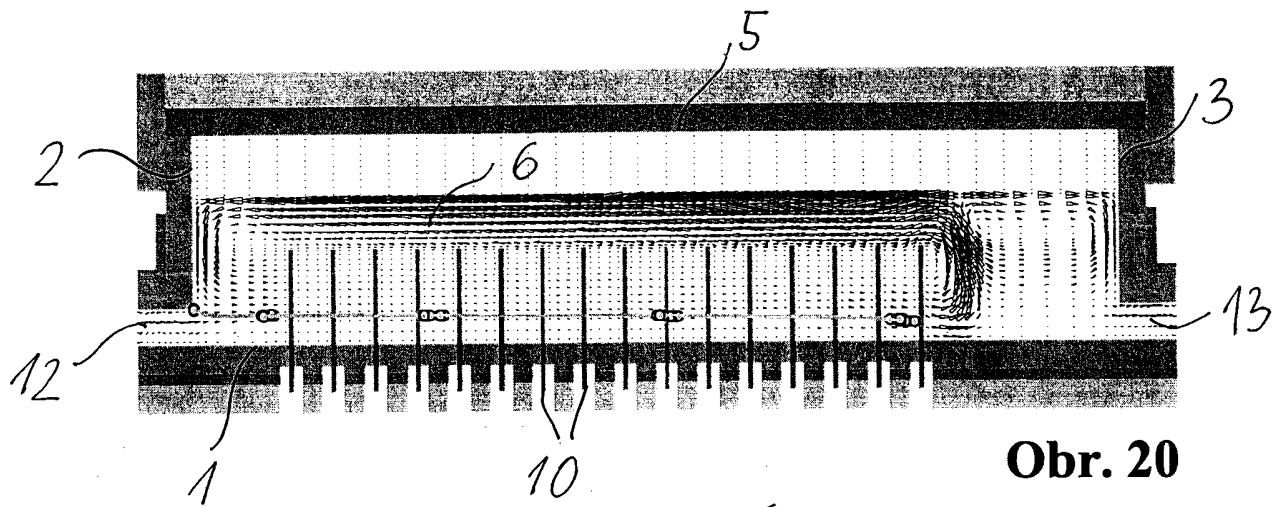
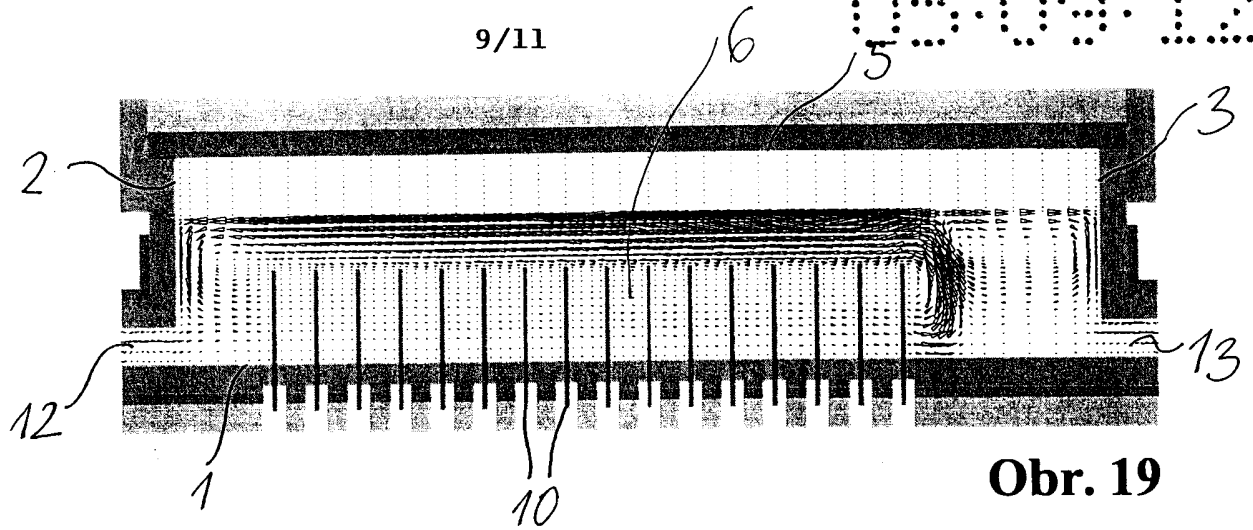
Obr. 16

9/11

702

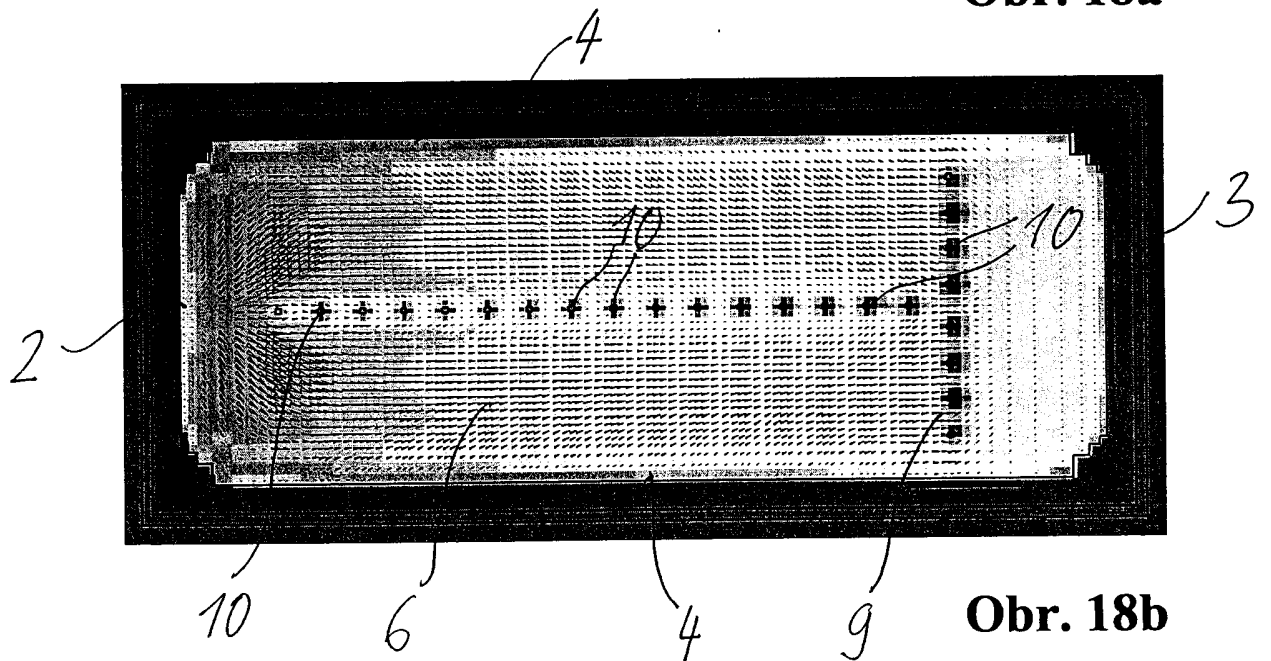
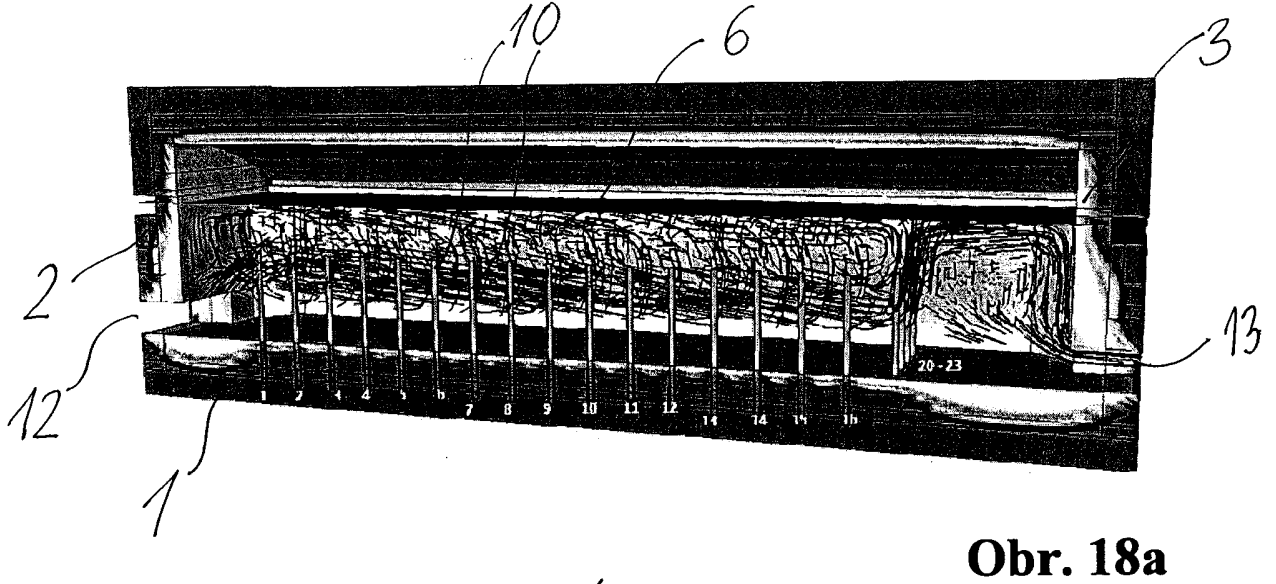
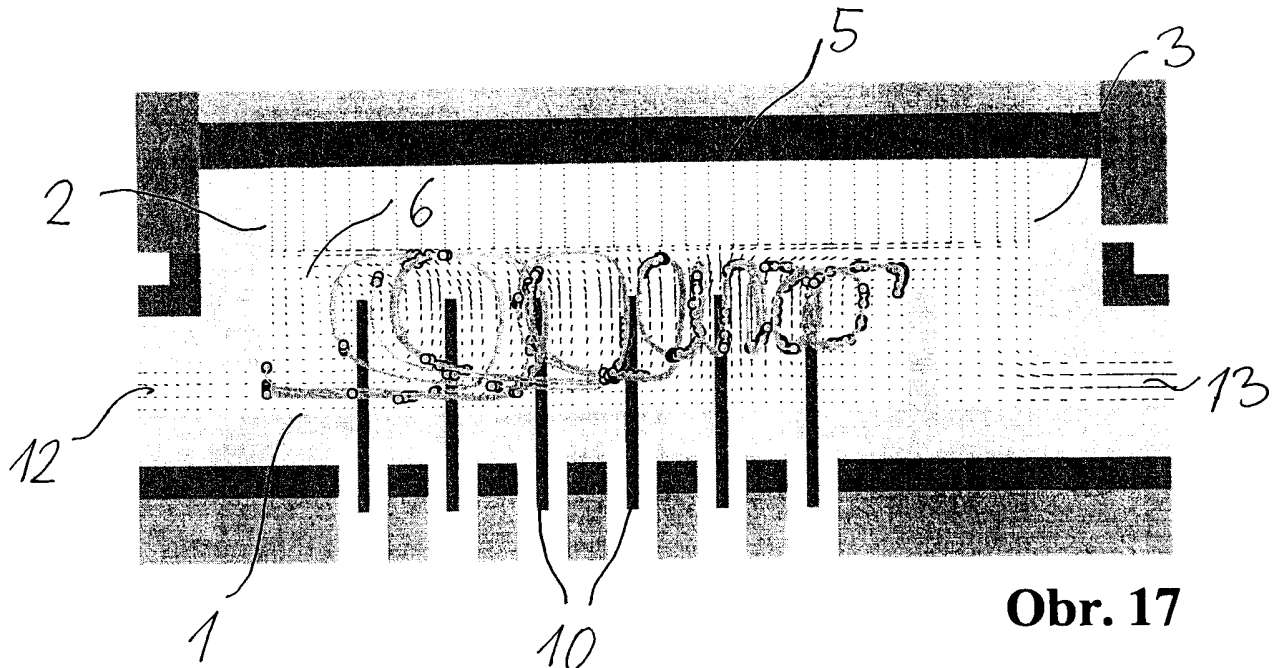
05.09.12

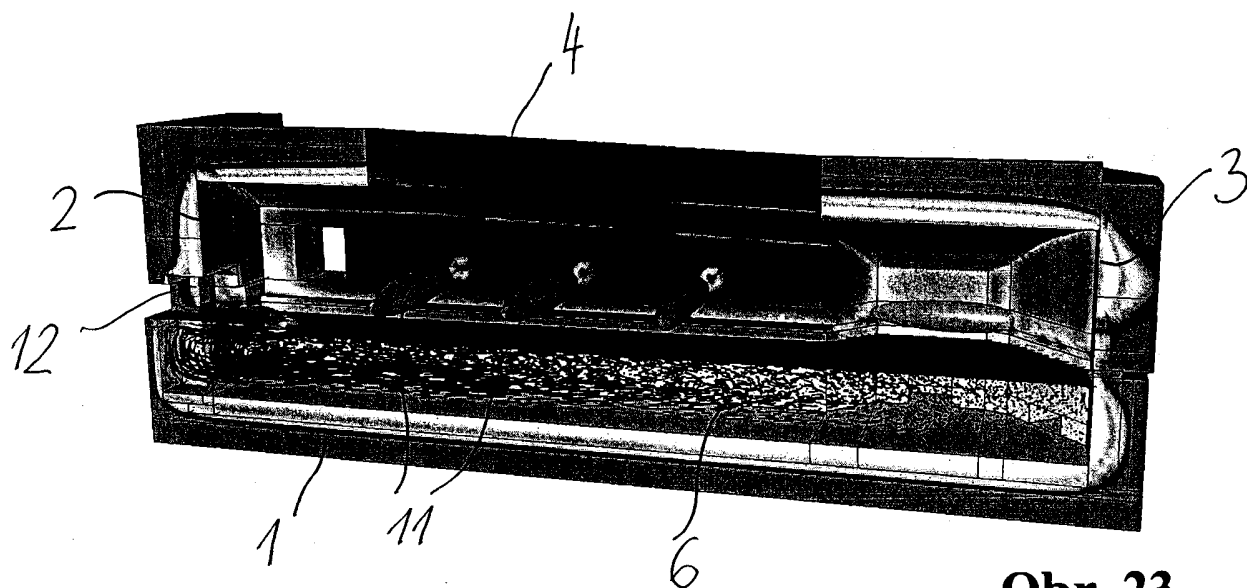
2012-605



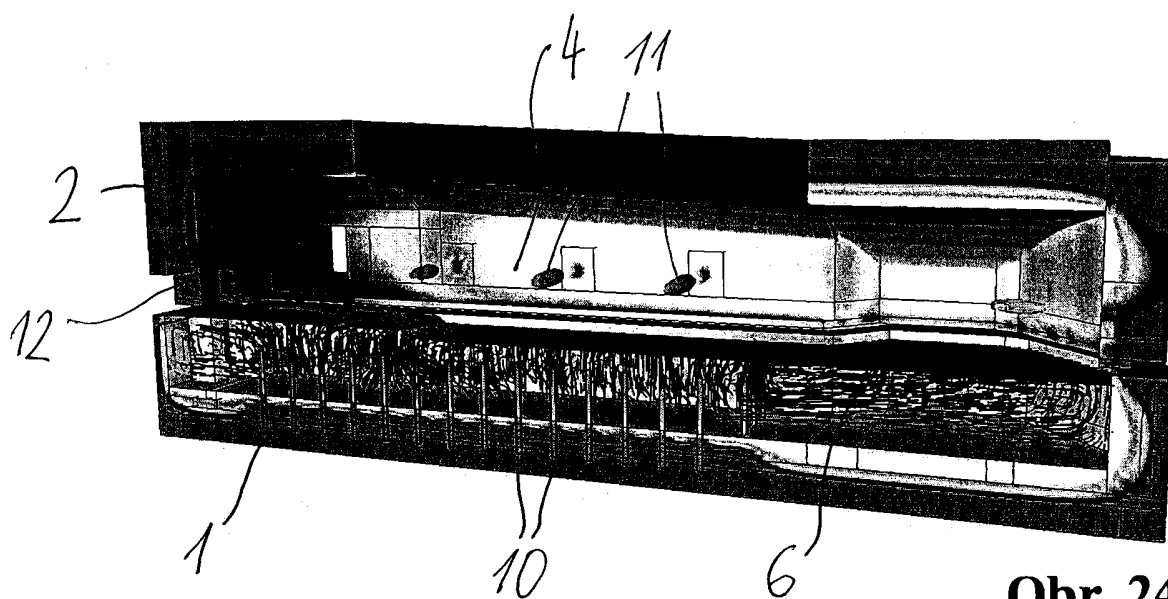
10/11

05.09.12





Obr. 23



Obr. 24