

UŽITNÝ VZOR

(11) Číslo dokumentu:

33 564

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

C03B 5/027 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2019-36964**
(22) Přihlášeno: **06.12.2019**
(47) Zapsáno: **20.12.2019**

(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, 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

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

(54) Název užitého vzoru:
**Sklářská tavící pec s konverzním regionem
na přeměnu sklářské vsázky na skelnou
taveninu**

CZ 33564 U1

Sklářská tavicí pec s konverzním regionem pro přeměnu sklářské vsázky na skelnou taveninu

5 Oblast techniky

Technické řešení se týká sklářské tavicí pece s konverzním regionem pro přeměnu sklářské vsázky na skelnou taveninu. Konverzní region s vysokou koncentrací topné energie pro přeměnu sklářské vsázky na skelnou taveninu má vrstvu sklářské vsázky na roztavené skelné tavenině. Konverzní region, obsahující dno, protilehlé boční stěny a čelní stěnu, je opatřený dvěma bočními vstupy a je ohříván elektrodami a plynovými hořáky. Sklářská tavicí pec dále obsahuje na konverzní region navazující homogenizační region ohříváný celoelektricky pro homogenizaci skelné taveniny.

15

Dosavadní stav techniky

Kontinuální sklářské tavicí pece s horizontálním průtokem taveniny lze rozdělit na vstupní (konverzní) region s vrstvou vsázky na hladině a homogenizační region, v němž se dokončují tavicí děje, především rozpuštění sklářského písku a 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 v důsledku málo intenzivního transportu tepla dovnitř vsázky [3] a rozsáhlý homogenizační region. Z homogenizačního regionu se do konverzního regionu dodává část energie zpětným cirkulačním tokem taveniny a v důsledku tohoto cirkulačního toku vznikají v homogenizačním regionu velké oblasti nevyužité pro uskutečnění homogenizačních dějů. Pro dosažení dostatečné homogenizační kapacity je proto třeba, aby byl homogenizační region rozsáhlý [5, 7].

Uvedené nízké konverzní rychlosti vsázky na sklo v konverzním regionu se řeší urychlením kinetiky procesu konverze, především zlepšením transportu tepla do vrstvy vsázky např. elektrickým přehřevem [8] nebo optimalizací mechanismu konverze [9].

Zmíněný problém velkého homogenizačního regionu a jeho nízkého využití pro homogenizační děje je pak možné řešit dvěma způsoby.

35

První způsob využívá separace průběhů jednotlivých tavicích dějů do příslušných oddělených prostorů, kterou lze uskutečnit např. tzv. segmentovou tavicí pecí, příkladem je Beerkensova tavicí pec [110]. 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.

Druhý přístup popisuje CZ 307659 [19]. Jedná se o tavicí prostor kontinuální tavicí pece s nátokem skla s nehomogenitami a způsob tavení skla v tomto prostoru. Tavicí proces je v jednom prostoru rozdělen pouze do dvou regionů a rozložením topné energie se ovlivňuje proudění v homogenizačním regionu tavicího prostoru tak, aby se omezily, případně úplně odstranily jeho neužitečné oblasti a homogenizační kapacita prostoru se podstatně zvýšila. To umožní zmenšit rozměr prostoru.

V CZ 307659 [19] a [1,2] byla zavedena relativní veličina nazvaná *využití tavicího prostoru*, která umožňuje kvantifikovat kvalitu proudění vzhledem k průběhu tavicího procesu. 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] a korespondující PCT přihláška [17], která popisuje sklářskou tavicí pec pro kontinuální tavení skel a pro způsob tavení.

55

Zjištěné využití tavicího prostoru pro průmyslově provozovanou sklářskou pec s vrstvou vsázky na hladině bylo pak velmi nízké, a to mezi 0,05 až 0,10 [3]. Nízké hodnoty využití jsou pro tyto průmyslové pece charakteristické. Důvodem bylo již zmíněné zpětné cirkulační proudění mezi
 5 homogenizační a konverzní částí pece. Jevilo se proto jako perspektivní uvedeným řízením toku využití prostoru podstatně zvýšit. Modelováním homogenizačního modulu se vstupem skelné taveniny obsahující písková zrna a bubliny a s řízeným prouděním v další části modulu se podařilo dosáhnout toku podobnému uniformnímu toku, který vykazoval hodnotu využití 0,5 a tavičí výkon až kolem 600 t/den [4]. Rozměr takového homogenizačního modulu byl přitom
 10 podstatně menší než průmyslový tavicí prostor a pohyboval se kolem 12,5 m³. Podmínky provozování tohoto homogenizačního modulu popisuje tavicí prostor kontinuální sklářské tavicí pece [18, 19, 20, 21].

Zmíněný druhý homogenizační region byl již autory řešen studiem charakteru proudění
 15 v homogenizačním modulu se vstupem taveniny obsahující nerozpuštěný sklářský písek a bubliny (bez sklářské vsázky) za pomoci veličiny *využití tavicího prostoru* [1-2] a teoretických vztahů umožňujících nastolení optimálního typu proudění [3, 4]. Nastavení kontrolovaného proudění pomocí matematického modelu prokázalo až násobné zvýšení homogenizačního výkonu. Takového kontrolovaného proudění taveniny se dosáhlo vhodnou prostorovou distribucí
 20 topné energie. Získal se tak malý homogenizační modul (prostor) o specifickém tavicím výkonu přesahujícím v optimálním případě značně 30 tm⁻³den⁻¹.

Při následném zahrnutí děje konverze vsázky do tavicího procesu se tedy jeví jako logické spojit uvedený homogenizační modul s nějakým regionem pro konverzi sklářské vsázky. Ve složeném
 25 tavicím prostoru by pak navrhovaný prostor se vsázkou byl prvním, konverzním regionem a již vyřešený homogenizační modul druhým, homogenizačním regionem. Konverzní region musí samozřejmě vykazovat srovnatelné výkonové parametry zjištěné pro homogenizační region.

Cílem technického řešení je nový konverzní region kontinuálního sklářského tavicího prostoru,
 30 který zajišťuje vysoký příkon energie, který svým vloženým otopem zajistí konverzi značného množství sklářské vsázky na sklo v relativně malém prostoru.

Podstata technického řešení

35 Tento úkol splňuje sklářská tavicí pec podle tohoto technického řešení, jehož podstata spočívá v tom, že konverzní region: je opatřen na každé protilehlé boční stěně bočním vstupem; je osazený tyčovými vertikálními elektrodami umístěnými ve dnu a vertikálními plynovými hořáky umístěnými v klenbě; má rozmístěny topné tyčové vertikální elektrody po celé ploše dna
 40 a vertikální hořáky po celé ploše klenby v pravidelných formacích; má osy vertikálních elektrod uspořádaných v minimálním odstupu 0,3 m od sebe a od stěn; má osy vertikálních hořáků uspořádané v minimálním odstupu 0,5 m od sebe a od stěn; a má špičky elektrod vzdáleny od spodního povrchu vrstvy sklářské vsázky maximálně 0,4 m.

45 Hlavní výhodou tohoto technického řešení je, že konverzní region má vysokou konverzní kapacitu díky vysoké koncentraci energie na relativně malém prostoru. Konverzní region jako první část sklářské tavicí pece pro konverzi sklářské vsázky využívá intenzivního odtavování sklářské vsázky na hladině taveniny soustředěným kombinovaným ohřevem sítí vertikálních hořáků a sítí vhodně rozmístěných vertikálních elektrod vyvolávajících vertikální toky horké
 50 taveniny k vrstvě vsázky. Příkon do regionu je volen tak, aby dodané množství energie zaručovalo konverzi veškeré dávkované vsázky na skelnou taveninu. Specifická rychlost konverze vsázky na sklo byla v tomto uspořádání asi třikrát vyšší, než bylo dosaženo pro konvenční horizontální sklářskou pec s regenerativním (plynovým) ohřevem a s menším elektrickým přihřevem. Nový konverzní region podle technického řešení se svou velikostí blíží
 55 homogenizačnímu regionu a předpokládaná konkrétní celková velikost obou regionů pece se

pohybuje mezi 24 až 30 m³. Při úplném zakrytí konverzního regionu sklářskou vsázkou byly tavicí výkony vysoké, přesahující 300 tun skla za den. Kapacita konverzního regionu se řízeně navýší nárůstem podílu energie pro konverzní region (k_1) dále úpravou poměru mezi množstvím elektrické a spalovací energie a vpuštěním vsázky do homogenizačního regionu. Navržený mechanismus konverze vsázky na taveninu se ukazuje jako efektivní.

Vertikální pozice elektrod a hořáků umožňuje přivést hlavní podíl tepla zdola i shora k vrstvě vsázky a ve skelné tavenině vyvolává vertikální cirkulace podél elektrod, které urychlují přenos tepla konvekcí do vsázky a odstraňují vzniklou chladnější taveninu od její spodní hranice.

Vhodné rozmístění pravidelných formací vertikálních topných elektrod a vertikálních topných plynových hořáků působí tak, že tyto zdroje energie zasahují horkými kolmými proudy taveniny a spalín celou plochu pokrytou vsázkou a zvyšují konverzní kapacitu konverzního regionu.

Dodržení nárokové vzdálenosti vzájemného odstupu vertikálních elektrod a též jejich nároková vzdálenost od bočních stěn a od čelní stěny konverzního regionu jsou bezpečné a zamezí vzájemnému ovlivnění účinků elektrod na dno a stěny konverzního regionu.

Dodržení nárokové vzdálenosti vzájemného odstupu vertikálních plynových hořáků a též jejich nároková vzdálenost od bočních stěn a od čelní stěny konverzního regionu jsou bezpečné a zamezí vzájemnému ovlivnění účinků topných plynových hořáků na stěny konverzního regionu.

Účelem nárokové a relativně malé vzdálenosti mezi špičkami elektrod od dolního povrchu vsázky je rychlý a čerstvý transport právě ohřáté a u špiček elektrod nejrychleji stoupající skelné taveniny k dolnímu povrchu vsázky. Výhodné se ukázaly např. vzdálenosti 0,3 až 0,1 m. Není vhodné, aby se špičky elektrod dotýkaly přímo sklářské vsázky, kde je podstatně nižší teplota skelné taveniny. Elektrody relativně dlouhé, s délkou dosahující bezprostředně k povrchu sklářské vsázky, zajišťují vysokou konverzní kapacitu.

Je výhodné, když konverzní region má podíl elektrické energie topných elektrod k celkové energii dodané do regionu topnými elektrodami a hořáky alespoň 50 %, s výhodou 60 až 80 %. V oblasti tohoto podílu byly nalezeny nejvyšší rychlosti konverze sklářské vsázky. Optimalizace podílu elektrické energie může přinést 20 až 30 % zvýšení konverzní rychlosti oproti podílu pouze odhadnutému.

Též je výhodné, když topné vertikální elektrody jsou tyčové molybdenové elektrody. V konverzním regionu se instaluje značné množství elektrod a je tedy vhodné použít elektrody běžně dostupné, avšak schopné odolávat vysokým koncentracím elektrické energie, což tyčové molybdenové elektrody splňují. Nevhodné jsou např. cíníčité tyčové elektrody nebo deskové molybdenové elektrody.

Dále je výhodné, když topné vertikální plynové hořáky jsou otápěny zemním plynem se vzduchem nebo kyslíkem. Jedná se o běžně dostupný a široce používaný otop spalováním, u kyslíku o poměrně novější ale dražší otop.

Nebo topné vertikální plynové hořáky mohou být jsou otápěny vodíkem se vzduchem nebo kyslíkem. Jedná se o nově uvažovaný otop, který nezanechává uhlíkovou stopu je tedy ekologicky výhodný, i když poměrně dražší.

Je výhodné, když konverzní region má maximální koncentraci topné energie elektrodami a plynovými hořáky 6 000 až 14 000 kW pro konverzi skelné vsázky na skelnou taveninu pro vznik 3 až 7 kg skla za sekundu. Konverzní rychlost přeměny sklářské vsázky na skelnou taveninu je v rozmezí 0,25 až 0,30 kg.m⁻² s⁻¹.

Za těchto řízených a nastavených podmínek je energie dodaná do konverzního regionu jeho vlastními zdroji, tedy elektrodami a plynovými hořáky efektivně a optimálně využitelná pro konverzi sklářské vsázky. V navazujícím homogenizačním regionu se tak lépe zabezpečí podmínky pro nastavení uniformního nebo spirálovitého toku s vysokým využitím prostoru.

5

Výhody navrhovaného konverzního regionu s instalovaným velkým elektrickým příkonem pomocí vertikálních elektrod ze dna a vertikálních hořáků z klenby lze shrnout takto:

1. Využitím optimálně hustého uspořádání vertikálních dlouhých elektrod ze dna se soustředí vysoký příkon Jouleovy energie do malého prostoru a nasměruje maximum příkonu těsně pod vrstvu vsázky. Podobné uspořádání elektrod lze uvažovat i pro návrh celoelektrické tavicí pece.

10

2. Ohřevem vznikají vertikální cirkulace taveniny, které míří vzhůru podél elektrod a po dosažení fázového rozhraní se obrací směrem dolů. Sestupné proudění je spojené s propadáním chladné taveniny vzniklé konverzí vsázky. Při aplikaci sítě ve dně uspořádaných elektrod se vytvoří obraz proudění ve tvaru vertikálních cirkulačních buněk. Horká stoupající tavenina atakuje kolmo vrstvu vsázky a zrychluje přenos tepla do vsázky, vzniklá chladná tavenina je sestupným buňkovým prouděním rychle odstraňována od fázového rozhraní.

15

3. K vytvoření vertikálních cirkulací v tavenině přispívají též vertikální hořáky. Sestupný proud vzniklé chladné taveniny se vytváří v místě styku horkých spalin se vsázkou.

20

4. Využití vertikálních hořáků namířených na vsázku umožní instalaci potřebného počtu zdrojů a umožní bezprostřední styk horkých spalin se vsázkou, což rovněž napomáhá podmínkám pro vysokou absorpci tepla a vysoký konverzní výkon regionu.

25

5. K dosažení maximálního výkonu slouží rovněž nastavení optimálního poměru mezi dodanou elektrickou energií (elektrodami) a energií pocházející ze spalování (hořáky), které je nastavitelné pro různé alternativní typy konverzního regionu za konkrétních podmínek.

30

6. Soustředěním velkého podílu celkové energie do malého konverzního regionu, s využitím funkce vertikálních elektrod ze dna a s délkou dosahující blízko k povrchu vsázky i využitím vertikálních hořáků blízko obou povrchů vsázky, se dosahuje vysokého teplotního gradientu i velké plochy pro předávání tepla radiálním rozlitem taveniny a spalin u povrchů. Místně proměnným prouděním se zajistí i předpokládané vysoké hodnoty efektivního součinitele přenosu tepla. Tím se zabezpečí optimální podmínky pro rychlou konverzi vsázky na skelnou taveninu.

35

7. Sestupné toky taveniny v buňkách jsou dostatečně rychlé, takže jsou schopné strhávat vzniklé malé i větší bubliny do hloubky skelné taveniny a narušovat vrstvu bublin a pěny, která snižuje přestup tepla ze sklářské taveniny do skelné vsázky.

40

8. Poměr mezi oběma typy energií v konverzním regionu společně s případně vzniklým místem volné hladiny taveniny u čela konverzního regionu podporuje nastolení podmínek pro žádoucí spirálovitý typ proudění v druhém homogenizačním regionu pece.

45

Objasnění výkresů

Technické řešení je podrobně popsáno dále na příkladných neomezuujících provedeních, objasněných na připojených schematických výkresech, z nichž znázorňuje:

50

Obrázek 1: Axonometrický pohled na konverzní region sklářské tavicí pece s umístěním elektrod a hořáků a s naznačeným homogenizačním regionem.

55

Obrázek 2: Pohled z obr. 1, znázorňující průměty umístění hořáků v klenbě do roviny XY v konverzním regionu a s naznačeným homogenizačním regionem.

Obrázek 3: Pohled z obr. 1 znázorňující průměty umístění elektrod do roviny XY v konverzním regionu a s naznačeným homogenizačním regionem.

Obrázek 4: Pohled z obrázku 1 v příčném řezu v rovině YZ v dané vzdálenosti od čelní stěny konverzního regionu, ukazující teplotní a proudové pole skelné taveniny v dolní části konverzního regionu a teplotní pole spalin v jeho horní části. Vlevo dole je znázorněn pohled shora na sklářskou pec a vedle je ukázána teplotní stupnice shora ukázaného konverzního regionu.

Obrázek 5: Závislost specifické konverzní rychlosti M_{sbatch} (sklářské vsázky na skelnou taveninu) na podílu k_l energie z celkové energie dodávané do pece.

Obrázek 6: STAV TECHNIKY - podélný centrální řez XZ klasickou regenerativní sklářskou pecí [3] ukazující podélnou cirkulaci skelné taveniny s detailem D, týkajícím se oblasti pece u hranice tavené sklářské vsázky a též s odpovídajícím prouděním a s teplotami v detailu.

Obrázek 7: Pohled shora z obr. 1 na vsázku na hladině taveniny v konverzním regionu a s naznačeným homogenizačním regionem. V dolní části vlevo je znázorněn pohled v rovině XY na sklářskou pec a vedle je ukázána teplotní stupnice shora ukázaného konverzního regionu.

Obrázek 8: Pohled shora z obr. 1 na vrcholy vertikálních proudových buněk pod rozhraním vrstvy vsázky a taveniny v konverzním regionu v řezu XY, který je v dané vzdálenosti od horního povrchu vsázky a s naznačeným homogenizačním regionem. V dolní části obrázku vlevo je znázorněn pohled v rovině XY na sklářskou pec a vedle je ukázána teplotní stupnice shora ukázaného konverzního regionu.

Obrázek 9: Axonometrický pohled na jiný alternativní konverzní region prostor sklářské tavicí pece s umístěním elektrod a hořáků a s naznačeným homogenizačním regionem.

Obrázek 10: Pohled shora z obr. 9 znázorňující průměty umístění elektrod do roviny XY a s naznačeným homogenizačním regionem.

Obrázek 11: Pohled shora z obr. 9 na vsázku na hladině taveniny v konverzním regionu a s naznačeným homogenizačním regionem. **Obrázek 12** zobrazuje pohled shora z obr. 9 na vrcholy vertikálních proudových buněk pod rozhraním vrstvy vsázky a taveniny v konverzním regionu v řezu XY, který je v určité vzdálenosti od horního povrchu vsázky a s naznačeným homogenizačním regionem. V dolní části obrázku vlevo je znázorněn pohled v rovině XY na sklářskou pec a vedle je ukázána teplotní stupnice shora ukázaného konverzního regionu.

Obrázek 13: Pohled z obrázku 9 v příčném řezu YX, který je v určité vzdálenosti od vnější čelní stěny konverzního regionu, ukazující pohled na teplotní a proudové pole taveniny v dolní části konverzního regionu a teplotní pole spalin v jeho horní části. V dolní části obrázku vlevo je znázorněn pohled v rovině YZ na sklářskou pec a vedle je ukázána teplotní stupnice shora ukázaného konverzního regionu.

Obrázek 14: Axonometrický pohled na další alternativní řešení konverzního regionu sklářské tavicí pece s umístěním elektrod a hořáků a s naznačeným homogenizačním regionem.

Obrázek 15: Pohled z obr. 14 znázorňující průměty umístění hořáků v klenbě do roviny XY v konverzním regionu a s naznačeným homogenizačním regionem.

Obrázek 16: Pohled z obr. 14 znázorňující průměty umístění elektrod ve dnu do roviny XY

v konverzním regionu a s naznačeným homogenizačním regionem.

Obrázek 17: Pohled shora z obr. 14 na vsázku na hladině taveniny v konverzním regionu a s naznačeným homogenizačním regionem. V dolní části obrázku vlevo je znázorněn pohled v rovině XY na sklářskou pec a vedle je ukázána teplotní stupnice shora ukázaného konverzního regionu.

Obrázek 18: Pohled shora z obr. 14 na vrcholy vertikálních proudových buněk pod rozhraním vrstvy vsázky a taveniny v konverzním regionu v řezu XY, který je v určité vzdálenosti od horního povrchu vsázky a s naznačeným homogenizačním regionem. V dolní části obrázku vlevo je znázorněn pohled v rovině XY na sklářskou pec a vedle je ukázána teplotní stupnice shora ukázaného konverzního regionu.

Obrázek 19: Pohled z obr. 14 v příčném řezu YZ, který je v určité vzdálenosti od vnější čelní stěny konverzního region. Pohled ukazuje teplotní a proudové pole taveniny v dolní části konverzního regionu a teplotní pole spalin v jeho horní části. V dolní části obrázku vlevo je znázorněn pohled v rovině XY na sklářskou pec a vedle je ukázána teplotní stupnice shora ukázaného konverzního regionu.

Příklady uskutečnění technického řešení

STAV TECHNIKY

Pro srovnání s řešením podle tohoto nového technického řešení je zde uveden **stav techniky** [3], a to jako příkladné řešení klasické regenerativní sklářské tavicí pece s menším elektrickým přehřevem.

Připojený **obrázek 6** znázorňuje podélný centrální řez XZ klasickou regenerativní sklářskou pecí s elektrickým přehřevem ukazující podélné cirkulace taveniny a teploty pod vrstvou vsázky a detail proudění v oblasti hranice vsázky [3]. Podélnou cirkulací se do konverzního regionu přenáší část tepla z hořáků z homogenizačního regionu, jak již bylo uváděno. Modelováním této průmyslové regenerativní pece s elektrickým přehřevem a s průměrnou teplotou tavení 1 387 °C [3] bylo však zjištěno, že při ohřevu vsázky horizontálním zpětným proudem horkého skla, procházejícího pod vsázkou z homogenizačního regionu pece a pokračujícího souběžně s vrstvou vsázky v konverzním regionu, jsou hodnoty specifické konverzní rychlosti značně nižší než hodnoty dosahované v konverzním regionu. Koncentrace energie pod vsázkou je nižší než v případě navrhovaného regionu, neboť energie je od místa maximální teploty přiváděna ve velké ploše. Energie se do vsázky předává především u čela vsázky, dále teplota horkého proudu klesá v důsledku faktu, že vzniklé chladné sklo zůstává dlouho blízko fázového rozhraní. Pro informaci ukazuje **obrázek 6** v podélném řezu tok horkého skla pod vrstvou vsázky, detail oblasti u hranice vsázky je uveden pod celkový náhled na podélný centrální řez prostorem. V **obrázku 6** ukazují šipky zpětný tok taveniny pod vsázkou, kde se teploty přiváděné taveniny před čelem vsázky pohybují nad 1 500 °C. Stykem se vsázkou však rychle klesají a ve větší vzdálenosti od čela se pohybují v oblasti kolem 1 350 °C. Horké sklo z maxima teplot proudící k čelu vsázky uskutečňuje v čele vsázky nejintenzivnější odtavování a vzniká zde větší množství chladné taveniny. Horké rychle proudící sklo zamíří za čelem vsázky poměrně rychle pod vzniklou chladnou taveninou a rovněž se ochlazuje, aniž by těsně kontaktovalo vsázkou. Toto proudění taveniny u hranice vsázky je dobře vidět na detailu řezu. Intenzita odtavování v oblasti za čelem vsázky oblasti je pak nízká. Kombinace o něco nižší průměrné tavicí teploty, typu ohřevu a charakteru proudění horké taveniny od teplotního maxima podél dolní hranice vsázky vedla ve všech sledovaných případech k nízké specifické konverzní rychlosti vsázky, která se v průměru pohybovala pouze kolem 0,09 kg/(m²s). V těchto případech občas používaný elektrický přehřev s ohřevem zdola může tuto situaci velmi mírně zlepšit. Modelováním zmíněné regenerativní tavicí pece ve 14 případech bylo zjištěno, že pokud je pod vsázkou umístěn elektrický přehřev

dodávající asi 25 % celkové energie, zvýší se specifická konverzní rychlost vsázky z hodnoty $0,087 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ na cca $0,093 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ [3]. To je však stále nízká hodnota oproti hodnotám 0,27 až $0,30 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ dosahovaným ve zde navrhovaném uspořádání.

5 Příklad 1

(Obr. 1 - 5, 7, 8)

Možné konkrétní provedení sklářského tavicí pece je schematicky ukázáno na obr. 1. Sklářská tavicí pec zahrnuje konverzní regionu 1 s naznačením homogenizačního regionu 6. Konverzní region 1 obsahuje dno 7, protilehlé boční stěny 10 a čelní stěnu 14. Je opatřený dvěma bočními vstupy 2 pro nakládání sklářské vsázky 5, a to vždy jedním vstupem 2 na každé vzájemně protilehlé boční stěně 10. Konverzní region 1 je otápěný kombinovaně, a to elektrodami 3 a plynovými hořáky 4. Oba zdroje mají vysokou koncentraci topné energie pro přeměnu sklářské vsázky 5 na skelnou taveninu 13. Sklářská tavicí pec dále zahrnuje celoelektricky otápěný homogenizační region 6, navazující na konverzní region 1. Konverzní region 1 je osazený tyčovými vertikálními elektrodami 3 umístěnými ve dnu 7 a vertikálními plynovými hořáky 4 umístěnými v klenbě 8 konverzního regionu 1. Konverzní region 1 má rozmístěny topné tyčové vertikální elektrody 3 po celé ploše dna 7 a vertikální hořáky 4 po celé ploše klenby 8 v pravidelných formacích. Osy 9 vertikálních elektrod 3 jsou uspořádány v minimálním odstupu $0,3 \text{ m}$ vzájemně od sebe a ve stejné minimální vzdálenosti od bočních stěn 10 nebo od čelní stěny 14 konverzního prostoru 1. Osy 11 vertikálních hořáků 4 jsou uspořádány v minimálním odstupu $0,5 \text{ m}$ od sebe a ve stejné vzdálenosti od bočních stěn 10 nebo od čelní stěny 14 konverzního prostoru 1. Špičky 12 elektrod 3 jsou vzdáleny od spodního povrchu vrstvy sklářské vsázky 5 maximálně $0,4 \text{ m}$. Topné vertikální elektrody 3 jsou tyčové molybdenové elektrody o délce dosahující bezprostředně k povrchu sklářské vsázky 5. Topné vertikální plynové hořáky 4 mohou být otápěny zemním plynem se vzduchem nebo kyslíkem; nebo vodíkem se vzduchem nebo kyslíkem.

Aby se vysokého homogenizačního výkonu homogenizačního regionu 6 s řízeným prouděním mohlo prakticky využít, musí mu předcházet intenzivní konverze sklářské vsázky 5 na sklo, neboť děje konverze vsázky 5 a homogenizační děje (rozpuštění sklářského písku a odstranění bublin v regionu s řízeným prouděním) jsou v sérii. Vznikne tak prostor se dvěma regiony 1, 6, konverzním regionem 1 a homogenizačním regionem 6. Je žádoucí, aby v takto složeném kompletním tavicím prostoru vykazoval konverzní region i dostatečnou kapacitu na ohřev i konverzi vsázky 5, a to v objemu konverzního regionu 1 zhruba srovnatelném s objemem homogenizačního regionu 6. Takže, výsledné zařízení ze dvou spojených regionů 1, 6 by bylo rovněž poměrně malé. Navrhovaný první konverzní region i sklářské tavicí pece podle tohoto technického řešení, který je předsazen homogenizačnímu regionu 6 s řízeným prouděním, splňuje tento požadavek.

Konkrétní řešení konverzního regionu 1 podle tohoto technického řešení počítá s příkonem energie do konverzního regionu 1 dostačujícím pro přeměnu vsázky 5 na sklo v množství, které odpovídá až stovkám tun skla za den, s využitím srovnatelného podílu energie dodávané z elektrod 3 a tepla spalin z hořáků 4, s kontrolovaným umístěním a rozmístěním elektrod 3 v tavenině 13 a hořáků 4 v konverzním regionu 1 a s vlastním objemem, který po sečtení s objemem homogenizačního regionu 6 dosáhne nejvýše desítek m^3 (pro srovnání: tavicí objem klasické pece středního až vyššího tavicího výkonu se pohybuje kolem 100 m^2 , tavicí plocha 80 až 100 m^2 podle hloubky taveniny 13). Konverzní výkon nového konverzního regionu 1 podle tohoto technického řešení se přitom přibližuje homogenizačnímu výkonu druhého homogenizačního regionu 6. Nový konverzní region 1 sklářské tavicí pece určený pro konverzi vsázky 5 na taveninu 13 není od dalšího homogenizačního regionu 6 pevně oddělen, je však funkčně samostatný. Hladina taveniny 13 v konverzním regionu 1 sklářské tavicí pece je částečně nebo zcela zakryta vrstvou vsázky 5. Velikost konverzního regionu 1 a stupeň pokrytí hladiny taveniny 13 závisí na očekávaném výkonu. Běžně se očekává úplné zaplnění konverzního

regionu 1 vsázkou 5. V zájmu vysokého tavicího výkonu je v některých případech možné, aby vsázka 5 částečně zasahovala i do druhého homogenizačního regionu 6. Homogenizační region 6 jako druhá část tavicího prostoru má nastaveno řízené proudění taveniny 13 a tento region 6 je přisazen k navrhovanému konverznímu regionu 1 pro rozklad sklářské vsázky 5.

Podrobněji.

Podle **obrázku 1** má navrhovaný konverzní region 1 dva boční vstupy 2 sklářské vsázky 5 v úrovni hladiny skelné taveniny 13. Vstupy 2 se většinou uvažují uprostřed bočních stěn 10 a jejich šířka zabírá kolem poloviny délky boční stěny 10 konverzního regionu 1, v daném konkrétním případě je např. 1 m. Umístění vstupů 2 v bočních stěnách 10 proti sobě není závazné, má však výhodu pro konverzi vsázky 5 na sklo při zaplnění konverzního regionu 1 vsázkou 5. Oba proudy vsázky 5 mířící proti sobě se střetávají v blízkosti podélné osy konverzního regionu 1, zpomalují se, a tím se v daném místě urychluje rozklad vsázky 5. Vzhledem k rozměru, kapacitě a podmínkám v dalším homogenizačním regionu 6 tavicího prostoru pece a k prvním modelovým zkušenostem s konverzí vsázky 5, má základní varianta navrhovaného konverzního regionu 1 sklářské tavicí pece, např. šířku 6 m, délku bočních stěn 10 má 2 m. Takže plocha hladiny taveniny 13 navrhovaného konverzního regionu 1 má 12 m²; a při výšce hladiny taveniny 13 odpovídající 1 m má objem 12 m³. Tím odpovídá navržené velikosti homogenizačního regionu 6, který má objem 12,44 m³. Při dimenzování kapacity a rozmístění topných elementů konverzního regionu 1 se vychází z kapacity homogenizačního regionu 6 pece, který při úplném rozpuštění vstupujícího sklářského písku a odstranění vstupujících bublin dosahuje 6 až 7 kg/s (kolem 500 až 600 t/den), při průměrné teplotě procesu, která je 1 420 °C [4] a při maximálním dovoleném zatížení topných zdrojů. Pro konverzi odpovídajícího množství vsázky 5 a částečné utavení odpovídajícího množství skla je konverzní region 1 vybaven kombinovaným ohřevem hořáky 4 a elektrodami 3, kde podíl elektrodami 3 dodaného Joulova tepla z celkové energie dodané do konverzního regionu 1 je poloviční až většinový. Vertikální elektrody 3 ze dna 7 se špičkami 12 nacházejícími se blízko vrstvy vsázky 5 jsou jednofázově či třífázově zapojeny do pravidelných formací; a celkově rozmístěny tak, že jejich přímý topný vliv zahrnuje celý dolní povrch vrstvy vsázky 5. Snahou navrženého rozmístění elektrod 3 je rovněž vyvolat v tavenině 13 vertikální horké proudy, které míří kolmo k dolní straně vsázky 5 a urychlit tak přenos tepla do vsázky 5 konvekci. Vertikální hořáky 4 umístěné v klenbě 8 konverzního regionu 1 jsou rovněž namířeny kolmo k hornímu povrchu vsázky 5 a jsou rozmístěny tak, aby spaliny omývaly celý horní povrch vsázky 5. V daném konverzním regionu 1 je tedy umístěna vysoká koncentrace topné energie, která je elektrodami 3 i hořáky 4 nasměrována k vrstvě vsázky 5. Vsázka 5 v běžných případech pokrývá část nebo celou hladinu navrhovaného konverzního regionu 1. Spaliny odcházejí nad hladinou do druhého homogenizačního regionu 6 pece a mohou částečně hradit tepelné ztráty klenbou 8.

V **obrázku 1** je uveden axonometrický pohled na konverzní region 1 sklářské tavicí pece pro rozklad sklářské vsázky 5 s typickým uspořádáním topných elektrod 3 a hořáků 4.

Pro základní variantu je navrženo 8 vertikálních hořáků 4 v klenbě 8, jejichž rozmístění je uvedeno v **obrázku 2**. Poloha osmi hořáků 4 v klenbě 8 je znázorněna kroužkované. Hořáky 4 jsou nasměrovány přímo na horní povrch vrstvy vsázky 5. V každé polovině konverzního regionu 1 jsou umístěny tři hořáky 4 do trojúhelníku blízko vstupu vsázky 5, dva hořáky 4 za sebou jsou pak umístěny v ose vstupů 2 blíže středu konverzního regionu 1. Tím se dosahuje dobrého pokrytí vsázky 5 horkými spaliny. Spaliny procházejí do druhého homogenizačního regionu 6 a odcházejí výdechem (výstupem) nad výstupem taveniny 13.

Obrázek 3 pak ukazuje průměty umístění elektrod 3 do roviny XY konverzního regionu 1. Elektrody 3 jsou zde vyznačeny malými kroužky ve čtverečích. Podle obrázku je v konverzním regionu 1 umístěno celkem 36 vertikálních elektrod 3 ve střídavých nebo řadových formacích, napájených jedno i třífázově.

Jouleovo teplo je uvažováno jako základní typ ohřevu, který bude mít vyšší kapacitu, než je uvažována pro otop plynem. Aby bylo případně dosaženo maximální homogenizační kapacity druhého homogenizačního regionu 6 kolem 7 kg/s (cca 600 t/den) [4], je třeba v prvním konverzním regionu 1 umístit značné množství zdrojů elektrické energie. Na utavení 1 kg skla/s ze vsázky 5 s 50 % střepů a ohřátí z pokojové teploty na průměrnou teplotu 1 420 °C je třeba cca 2 050 kW. Celková maximální kapacita ohřevu prvního konverzního regionu 1 by tedy měla být kolem 15 000 kW. Takto dochází v prvním konverzním regionu 1 k vysoké koncentraci energie, kterou je třeba soustředit blízko vrstvy vsázky 5. Při společném provozování obou regionů 1, 6 sklářské pece se předpokládá, že bude dosaženo maximálního tavičního (konverzního) výkonu o něco nižšího, než činí maximální výkon samotného homogenizačního regionu 6. Toto maximální množství utaveného skla ze vsázky 5 za optimálně dosažených podmínek v celé peci bylo odhadnuto mezi 400 a 500 t/den (5 až 6 kg/s). Důvodem pro snížení uvažované taviční kapacity je předpoklad plynoucí z předběžných výpočtů, podle nichž navrhovaný konverzní region 1 nemusí při vysokém průchodu vsázky 5 absorbovat veškerou dodávanou energii vzhledem k pomalejší kinetice absorpce tepla a rozkladu vsázky 5. Potřebné maximální celkové množství tepla se ztrátami se pak pohybovalo kolem 12 500 kW, na teplo dodané hořáky 4 se uvažuje zhruba 2 500 kW, předpokládaný podíl elektrické energie z celkové dodané energie do konverzního regionu 1 je tedy 80 %. Pro dodávku Jouleova tepla je tak třeba do konverzního regionu 1 s objemem 12 m³ (6 x 2 x 1 m) umístit elektrické zdroje o výkonu kolem 10 000 kW. Toto vysoké množství energie vyžaduje technicky řešitelné a z hlediska procesu otopu a konverze vsázky 5 výhodné umístění zdrojů.

Pro otop byly zvoleny dlouhé vertikální elektrody 3 ze dna 7 konverzního regionu 1, takže do poměrně malého prostoru je jich možno umístit potřebné množství. Elektrody 3 mají průměr 76 mm, je však možno volit i elektrody 3 tlustší (např. 100 mm), délka elektrod 3 v konverzním regionu 1 je 0,8 až 0,9 m. Značná délka elektrod 3 umožňuje dodat do taveniny 13 maximální množství energie a velký podíl energie umístit přímo pod vsázkou 5, kde jsou špičky 12 elektrod 3. Pro tavení je třeba využít celého prostoru konverzního regionu 1 a respektovat obvyklé minimální vzdálenosti mezi elektrodami 3 (cca 300 mm). Standardní případ pak uvažuje v prostoru každého vstupu 2 umístění 4 trojic vertikálních elektrod 3 v třífázovém zapojení (počet trojic může být zvýšen na 6). Uprostřed mezi vstupy 2 jsou umístěny podél podélné osy pece dvě řady elektrod 3, každá řada v počtu 6 (v případě 4 trojic třífázově zapojených elektrod 3) nebo jedna řada v podélné ose pece rovněž v počtu 6 elektrod 3 (v případě rozšíření počtu trojic elektrod 3 u jednoho vstupu 2 ze 4 na 6). Tyto elektrody 3 jsou zapojeny jednofázově. Celkem je tedy v základní variantě v prvním konverzním regionu 1 umístěno 36 elektrod 3.

Rozmístění elektrod 3 v prvním konverzním regionu 1 v řezu XY prezentuje již zmíněný **obrázek 3**. Ve zde uvedeném příkladu bylo celkem dodáváno 2 590 kW do hořáků 4 a 6 130 kW Jouleova tepla do elektrod 3, podíl Jouleova tepla z celkové dodané energie byl tedy 70,3 %. Do třífázově zapojených elektrod 3 bylo dodáváno celkem 4 360 kW a do centrálních jednofázově zapojených elektrod 3 ve dvou řadách celkem 1 770 kW. Energie do jednotlivých typů zapojení byla rozdělována rovnoměrně. Na vstupní konverzní region 1 pak navazuje homogenizační region 6, jehož předpokládané, avšak zatím nepotvrzené umístění je v **obrázku 3** naznačeno. Výkony obou regionů 1 a 6 pece musí být v konečné fázi sladěny, vzájemný vztah příkonů do obou regionů 1 a 6 pece je vyjadřován podílem celkové energie dodávané do konverzního regionu 1 pece z celkové energie dodávané do obou regionů 1 a 6, tento podíl se vyjadřuje symbolem k_l . Úkolem tohoto příkladu je nalézt podmínky pro vysoký konverzní výkon konverzního regionu 1, který bude srovnatelný se známou homogenizační kapacitou druhého regionu 6.

Jsou možná i jiná rozmístění elektrod 3 než zde uvedená, avšak navržené poměrně rovnoměrné rozmístění elektrod 3 pod plochou sklářské vsázky 5 se ukázalo jako výhodné z hlediska konverze vsázky 5 na skelnou taveninu 13 a následné homogenizace taveniny 13 v homogenizačním regionu 6 části pece. Celkově je v konverzním regionu 1 vysoká specifická koncentrace energie, dlouhé vertikální elektrody 3 pak ohřívají taveninu 13 především u svých

hrotů 12 nacházejících se blízko dolnímu povrchu vsázky 5, takže vysoká koncentrace energie se soustřeďuje především do vrstvy taveniny 13 pod povrchem vsázky 5. Rovněž kinetické podmínky jsou velmi příznivé, neboť kolmo ke vsázce 5 je podél elektrod 3 vysílána rychle proudící tavenina 13 podstatně vyšší teploty (1 480 až 1 500 °C), než je průměrná teplota v konverzním prostoru 1 (1 420 °C).

Ve skelné tavenině 13 se pak objevují žádané cirkulační buňky vertikálního vzestupného a sestupného proudění. Stoupající horká tavenina 13 se u povrchu vsázky 5 a po intenzivním styku s vrstvou vsázky 5 mísí s chladnou taveninou 13 vzniklou tímto kontaktem. Ochlazená tavenina 13 se rychle odstraňuje od povrchu vsázky 5 sestupným cirkulačním proudem buňky. Na proudění se podílí i hořáky 4, neboť v místě styku spalin se vsázkou vzniká konverzí vsázky 5 opět tavenina 13, která vsázkou 5 protéká a vytváří rovněž místa klesající taveniny 13 pod vsázkou 5, která mohou být samostatná, nebo se spojí s místy klesání chladné taveniny 13 vzniklé ohřevem elektrodami 3. Definitivně vzniklá struktura vertikálního cirkulačního proudění (buňkového) je pak výsledkem účinku ohřevu elektrodami 3 a hořáky 4 a klesání chladné taveniny 13 vzniklé utavením vsázky 5. Pokud není povrch taveniny 13 v navrhovaném konverzním regionu 1 zcela zaplněn vsázkou 5, dodává se teplo do vsázky 5 elektrodami 3 pod volnou hladinou a přímým stykem spalin s hladinou taveniny 13. Vzniklými intenzivními vertikálními cirkulacemi taveniny 13 je snižován vertikální teplotní gradient v tavenině 13, což je výhodné pro nastolení řízeného toku taveniny 13 v druhém homogenizačním regionu 6 pece. Za daných podmínek teplotních 1 konvektivních se v tomto případě a dalších v nastaveních s hladinou taveniny 13 zaplněnou i ne zcela zaplněnou vsázkou 5 dosahovalo specifické konverzní rychlosti vsázky 5 mezi 0,27 až 0,30 kg/(m²s).

Typický charakter vznikajícího buňkového proudění vdaném příkladu ukazuje v **obrázku 4** příčný řez navrhovaným konverzním regionem 1. Pro vyhodnocení konverzní funkce daného rozmístění vertikálních elektrod 3 byl zvolen případ odpovídající průtoku taveniny 13 o hodnotě 3,826 kg/s při hodnotě podílu $k_I = 0,863$, kde k_I představuje podíl energie dodané do konverzního regionu 1 z celkové dodané energie. Za těchto podmínek byla hladina celého konverzního regionu 1 zaplněna vsázkou 5. Na **obrázku 4** jsou těsně pod fázovým rozhraním rovněž vidět malé trychtýřky klesající taveniny 13 nižší teploty, které vznikají účinkem jak elektrod 3 tak hořáků 4. Jejich místo ve vrstvě vsázky 5 je v obrázku vyznačeno vertikálními šipkami. Tyto trychtýřky jsou někdy výsledkem spolupráce elektrod 3 s hořáky 4, jindy patří jen jednomu zdroji tepla.

Hodnoty, dosažené specifické konverzní rychlosti M_{sbatch} [kg/(m²s¹)] vsázky 5 na taveninu 13 pro další případy v tomto konverzním regionu 1 v **obrázcích 1 až 3**, jsou pak uvedeny v obrázku 5. Číselné hodnoty v legendě obrázku 5 udávají průtok taveniny 13 konverzním regionem 1 v kg/s. Je zřejmé, že hodnoty specifické konverzní rychlosti přibližně lineárně rostou s hodnotou k_I , tj. s rostoucím energetickým zatížením konverzního regionu 1.

Typ konverze vsázky 5 odtavováním v navrhovaném konverzním regionu 1 se tedy liší od konverze vsázky 5 v klasické horizontální peci s převládajícím ohřevem spalinami a se silným a rozsáhlým podélným cirkulačním prouděním.

V novém konverzním regionu 1 podle tohoto technického řešení existuje v tavenině 13 u fázového rozhraní vysoký teplotní gradient po celé ploše pokryté vsázkou 5 a současně slouží velká plocha vsázky 5 pro přímé předávání tepla z elektrod 3 do vsázky 5. Tato plocha vzniká u dolní hranice 15 vsázky 5 radiálním rozlitím kolmo přitékající horké taveniny 13 proudící od špiček 12 elektrod 3, další část plochy pak slouží pro vertikální odstraňování vzniklé chladné taveniny 13. Odtavování vsázky 5 horkou taveninou 13 a odstraňování chladné taveniny 13 pobíhá tedy v celé vsázkou 5 pokryté ploše. Lze pak předpokládat, že za podmínek intenzivní místně proměnné konvekce se dosahuje i vyšší hodnoty efektivního součinitele přestupu tepla. Jsou pak splněny podmínky vysokého gradientu, velké styčné plochy i vysoké hodnoty součinitele přenosu pro intenzivní tok tepla do vsázky 5 z taveniny 13. Přímý styk spalin, které se

pak rozlévají prakticky po celém horním povrchu vsázky 5, zajišťuje dobrý přenos tepla i shora. Efekt daného typu ohřevu a vzniklého typu vertikálního buňkového proudění je využitelný i v tavicích prostorech s vertikálním průchodem taveniny 13, kdy se vsázka 5 nakládá současně na celou hladinu konverzního regionu 1 (jako v celoelektrické peci). Buňkové proudění zde vzniká pouze účinkem elektrod 5, utavené sklo vzniká pouze zespoda a je odváděno do navazujícího homogenizačního regionu 6.

Typ ohřevu a proudění i průměrná teplota nastolené vertikálními elektrodami 3 v poměrně hustém uspořádání a vertikální hořáky 4 v konverzním regionu 1 až trojnásobně zvyšují specifickou konverzní rychlost vsázky 5. Ve zkoumaných případech byl podíl z celkové energie určený pro dodávku pod vsázku 5 a do hořáků 4 vysoký ($k_I > 0,7$) a bylo tedy k dispozici dost energie pro odtavování vsázky 5 silným vertikálním cirkulačním prouděním taveniny 13. Jak je zřejmé z **obrázku 5**, specifická konverzní rychlost podle očekávání stoupala s podílem celkové energie určené do oblasti vsázky 5. Maximální hodnoty byly dosahované pro $k_I = 0,90$ až $0,95$. Vysoká hodnota k_I je posléze výhodná i pro efektivní spojení s homogenizačním regionem 6, neboť je potřebná pro nastolení efektivního uniformního nebo spirálovitého proudění v tomto homogenizačním regionu 6.

Centrální řada nebo dvě centrální řady elektrod 3 v oblasti podélné osy navrhovaného konverzního regionu 1 pomáhají pak přenášet teplo k hranici vsázky 5 a podporují dokončení konverze vsázky 5 i vznik spirálovitého toku taveniny 13, který je velmi efektivní v následujícím homogenizačním regionu 6 pece (viz příčné cirkulace ve střední části **obrázku 4**).

Z uvedeného je zřejmé, že charakter proudění v konverzním regionu 1 pece se nepodobá proudění nastavovanému v následném v homogenizačním regionu 6, přičemž konverzní region 1 je spíše uspořádaný míšič než prostor s laminárním souběžným tokem. Výsledná pec bude tedy zařízením s dvěma značně odlišnými a řízenými charakterly toku a spojením obou regionů 1, 6 bude třeba dosáhnout zachování těchto odlišných charakterů míšiče a navazujícího uniformního nebo spirálovitého toku.

Zaplnění konverzního regionu 1 vsázkou 5 a průběh konverze vsázky 5 jsou dále demonstrovány následujícími **obrázky 7 a 8**.

Obrázek 7 s pohledem na vsázku 5 plovoucí na hladině taveniny 13 ukazuje, že vsázka 5 částečně vnikla do druhého homogenizačního regionu 6. Pruh vyšší teploty v podélné ose konverzního regionu 1 (tmavší odstín) indikuje zvýšenou konverzi vsázky 5 v místě střetu obou jejích proudů. Průtok taveniny 13 činil $3,826 \text{ kg/s}$ při hodnotě $k_I = 0,863$.

Obrázek 8 pak ukazuje pohled shora na vertikální proudové buňky pod fázovým rozhraním vsázky 5 a taveniny 13 v prvním konverzním regionu 1. Jedná se o vrcholy těchto vertikálních buněk, které mají přibližně tvar šestiúhelníku. Tmavší místa vysokých teplot se objevují nad špičkami 12 elektrod 3 a jsou oblastmi vzestupného toku taveniny 13 kolem elektrod 3, které odtavují vsázku 5. Světlejší prstence jsou oblasti nižších teplot se sestupnými proudy taveniny 13. Hodnoty průtoku taveniny 13 a hodnota k_I jsou stejné jako v **obrázku 7**.

Dosahovaný výkon $3,83 \text{ kg/s}$ (328 t/den) v daném příkladu (a v dalších dvou příkladech v **obrázku 5** se stejným průtokem) je prozatím menší, než odpovídá maximální homogenizační kapacitě druhého homogenizačního regionu 6 pece. Proto vznikne v homogenizačním regionu 6 tavicí rezerva. Při odstraňování této rezervy bude třeba, aby konverzní výkon vsázky 5 stoupal, a to se bude dít zvyšováním podílu energie dodané do prvního konverzního regionu 1 podle **obrázku 5**, nebo jak indikují další výsledky, malým poklesem podílu elektrické energie dodávané do konverzního regionu 1. Konečnou hodnotu konverzního výkonu je však možné zjistit až harmonizací s průběhem tavicích dějů (rozpuštění písku, odstraňování bublin) v homogenizačním regionu 6 pece. Demonstrovaný případ ale ukazuje, že zvolený tvar, rozměr a způsob ohřevu konverzního regionu 1 mají přijatelně vysokou kapacitu pro efektivní konverzi

vsázky 5 na taveninu 13.

Příklad 2

5 (Obrázky 9 až 13)

Předmětem příkladu je alternativní konverzní region 1 pro přeměnu sklářské vsázky 5, který má stejné rozměry jako v předchozím případě, avšak s předpokladem budoucí adaptace konverzního regionu 1 se smíšeným ohřevem na celoelektrickou pec. Proto byla zvýšena kapacita elektrického ohřevu pod vrstvou vsázky 5 na cca 12 000 kW. Ve zde navrhovaném konverzním regionu 1 bylo zachováno stejné uspořádání hořáků 4 jako v příkladu 1. Axonometrický pohled na dolní část konverzního regionu 1 s elektrodami 3 poskytuje **obrázek 9**. Konverzní region 1 má opět dva boční vstupy 2 vsázky 5. U každého vstupu 2 je nyní v řadách po dvou umístěno 6 trojic elektrod 3 v třífázovém zapojení, celkem je tedy v regionu umístěno 12 trojic třífázově zapojených elektrod 3. V podélné ose konverzního regionu 1 je umístěna řada 6 jednofázově zapojených elektrod 3, takže celkový počet elektrod 3 v navrhovaném konverzním regionu 1 je 42. Vertikální elektrody 3 mají průměr 100 mm, jejich délka je 0,8 m, přičemž délku je možno zvětšit ještě na 0,9 m (testováno). Konverzní region 1 je shora vytápěn opět osmi vertikálními hořáky 4 ve stejné konfiguraci jako v příkladu 1 (**obrázek 2**). V daném ověřovacím případě je dodáváno 1 834 kW hořáky 4 a 6 254 kW elektrodami 3, takže podíl Jouleova tepla z celkově dodávané energie činí 77,3 %. Do třífázově zapojených elektrod 3 bylo dodáváno rovnoměrně 5 538 kW, do centrální řady jednofázově zapojených elektrod 3 celkem 716 kW.

Pohled shora s detailním uspořádáním elektrod 3 a pohled na vsázku 5 mírně zasahující do druhého homogenizačního regionu 6 pece jsou schematicky vyobrazeny na **obrázcích 10 a 11**.

Obrázek 10 v pohledu shora ukazuje, že v tomto případě je v každé polovině konverzního regionu 1 umístěno 6 trojic třífázově zapojených elektrod 3 a v podélné ose konverzního regionu 1 je umístěna řada šesti elektrod 3 jedno fázově zapojených.

Obrázek 11 ukazuje povrch vsázky 5 plovoucí na hladině taveniny 13 v řezu XY, kdy vsázka 5 ještě zcela nezaplnila konverzní region 1, avšak zasahuje částečně do homogenizačního regionu 6. Za těchto podmínek činil průtok taveniny 13 3,50 kg/s a hodnota k_l byla rovna 0,87.

V daném případě docházelo rovněž k intenzivnímu odtavování vsázky 5 horkými vertikálními proudy taveniny 13 od elektrod 5. Tvar vrcholů proudových buněk kolem jednotlivých elektrod 3 je při pohledu shora méně výrazný než v předchozím příkladu, viz **obrázek 12**, kde tmavší odstín vrcholů buněk opět znázorňuje vzestupný proud horké taveniny 13 a světlejší místa sestupný proud s odtavenou skelnou taveninou 13. Tmavá oblast kolem podélné osy znázorňuje volnou hladinu s vysokou teplotou. Konverzní výkon konverzního regionu 1 činil pak zmíněných 3,50 kg/s (302,4 t/den) a dosažená specifická rychlost odtavování vsázky 5 byla 0,294 kg/(m²s⁻¹). Charakter buňkového proudění zůstal zachován.

Obrázek 13 ukazuje v příčném řezu (YZ) teplotní pole taveniny 13 kolem elektrod 3 i ve spalovacím prostoru konverzního regionu 1 v blízkosti vrstvy vsázky 5 a charakter vertikálního cirkulačního proudění v tavenině 13. Charakter tohoto proudění, vyvolaného ohřevem elektrodami 3, hořáky 4 i klesáním chladné taveniny 13 z utavené vsázky 5, je podobný jako v příkladu 1. Nástup sestupných proudů taveniny 13 vznikající ze vsázky 5 je opět označen šipkami.

V daném případě byl získán průměrný specifický konverzní výkon vsázky 5 (0,294 kg/(m²s)), který může být ještě nepatrně zvětšen při zvýšení hodnoty k_l . Celková konverzní kapacita konverzního regionu 1 302,4 t/den se při harmonizaci konverzního výkonu s výkonem homogenizačního regionu 6 sklářské pece musí zvýšit zvětšením hodnoty k_l (podobně jako ukazuje **obrázek 5** pro příklad 1) nebo změnou poměru množství elektrické a spalovací energie,

výjimečně může být zvětšen celý konverzní region 1 pro konverzi vsázky 5 až do dosažení příslušné kapacity homogenizačního regionu 6.

Příklad 3

(Obrázky 14 až 19)

Předmětem příkladu je další alternativní konverzní region 1 stejného tvaru jako v předchozích dvou případech, avšak navrhovaný konverzní region 1 je prodloužený v zájmu zvýšení konverzní kapacity. Délka konverzního regionu 1 se takto z původních 2 m zvýšila na 2,75 m, jeho šířka zůstává na 6 m a prostor má dva boční vstupy 2 široké 1,5 m, které jsou umístěny centrálně v podélných bočních stěnách 10. Navrhovaný objem konverzního regionu 1 pro konverzi vsázky tak činil 16,5 m³. Axonometrický pohled na dolní část konverzního regionu 1 s elektrodami 3 poskytuje **obrázek 14**, průměty vertikálních hořáků 4 v klenbě 8 do roviny XY navrhovaného konverzního regionu 1 jsou ukázány v **obrázku 15** a průměty rozložení elektrod 3 ve dnu 7 v **obrázku 16**. Hořáky 4 jsou vyznačeny dvojími kroužky, topné elektrody 3 kroužky ve čtverečcích.

konverzním regionu 1 je u každého vstupu 2 umístěno 9 trojic třífázové zapojených elektrod 3 (ve třech řadách po třech trojicích), v podélné ose konverzního regionu 1 je umístěna řada osmi jedno fázově zapojených elektrod 3. Celkem je v konverzním regionu 1 instalováno 62 elektrod 3. Průměr elektrod 3 činí 100 mm. Nad hladinou je v klenbě 8 umístěno 10 vertikálních hořáků 4. Jedná se o pět dvojic hořáků 4 po šířce konverzního regionu 1.

V konkrétním případě činil konstantní příkon energie do hořáků 4 3 230 kW, energie byla do hořáků 4 rozmístěna rovnoměrně, příkon Joulova tepla do elektrod 3 v demonstrovaném případě činil 6 900 kW. Z toho 5 645 kW do třífázově zapojených elektrod 3 a 1 255 kW do jednofázově zapojených elektrod 3. Podíl elektrické energie v konverzním regionu 1 tedy činil 68,1 %. Energie byla v jednotlivých zapojeních rozmístěna rovnoměrně. Nastolený konverzní výkon činil 4,4 kg/s při hodnotě $k_I=0,85$.

Pokrytí hladiny plovoucí vsázkou 5 v daném případě při pohledu shora ukazuje **obrázek 17**. Pruh vyšší teploty v podélné ose konverzního regionu 1 (tmavší místo) indikuje zvýšenou konverzi vsázky 5. Vsázka 5 tento konverzní region 1 opět zcela zaplňuje.

konverzním regionu 1 se opět vyvinuly konvekční buňky, jejichž vrcholy pod vrstvou vsázky 5 při pohledu shora demonstruje **obrázek 18**. Buňky jsou místy deformovány rychlým horizontálním tokem taveniny 13. V **obrázku 18** je znázorněno teplotní pole taveniny 13 kolem elektrod 3 v blízkosti vrstvy vsázky 5 a charakter vertikálního cirkulačního proudění vyvolaného ohřevem elektrodami 3 s hořáky 4 a klesáním taveniny 13 vzniklé utavením vsázky 5. Sytější zabarvení uprostřed vrcholu buněk označuje vzestupný proud taveniny 13 jako v předchozích případech.

Teplotní pole taveniny 13 kolem elektrod 3 v blízkosti vrstvy vsázky 5 a charakter vertikálního cirkulačního proudění vyvolaného ohřevem elektrodami 3 s hořáky 4 a klesáním taveniny 13 vzniklé utavením vsázky 5 (označeno šipkami) v konverzním regionu 1 pak ukazuje **obrázek 19** v příčném řezu konverzním regionem 1 (YZ řez). Průtok taveniny 13 činí 4,40 kg/s, a hodnota $k_I=0,8$. Za daných podmínek při zmíněném průtoku taveniny 13 4,4 kg/s (380 t/den) činila specifická konverzní rychlost vsázky 5 0,264 kg/s. Zvýšení hodnoty M_{sbach} se dosáhne zvýšením k_I při harmonizaci výkonu navrhovaného konverzního regionu 1 s výkonem druhého homogenizačního regionu 6 pece.

Seznam literatury

1. L. Němec, P. Cincibusová, *Ceramics-Silikáty* 53 (2009) 145-155.

2. L. Němec, P. Cincibusová, *Ceramics-Silikáty* 52 (2008) 240-249.
Tokyo 1984.
- 5 6. A. Smrček a kol.: Tavení skla, Česká sklářská společnost o.s. Jablonec nad Nisou 2008, str. 280.
7. Z. Zhiqiang, Y. Zhihao. Basic flow pattern and its variation in different types in glass tank furnaces, *Glast. Bcr. Glass Sci. Technol.* 70 (1997), (6) 165-172.
- 10 8. J. Staněk: Elektrické tavení skla, SNTL Praha 1986.
9. A. Paul: Chemistry of Glasses, Chapter 5. P. Hrma. Batch melting reactions.
15 Chapman & Hall
10. R. Beerkens, Modular melting. *Amer. Cer. Soc. Bull.* 73 (2004), (7), 35.
- 20 11. L. Němec, P. Cincibusová, *Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. 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>
- 25 13. M. Polák, L. Němec, *J. Non-Cryst. Solids* 35M (2012) 1210-1216.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.02.021>
14. P. Cincibusová, L. Němec, *Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. Technol. A* 53 (2012) 150-157.
- 30 15. M. Polák, L. Němec, P. Cincibusová, M. Jebavá, J. Brada, M. Trochta: Sklářská tavičí pec pro kontinuální tavení skel řízenou konvekcí. CZ patent 304 703 (2012).
16. M. Polák, L. Němec, P. Cincibusová, M. Jebavá, J. Brada, M. Trochta: Způsob kontinuálního tavení skel řízenou konvekcí skloviny. CZ patent 304 432 (2012).
- 35 17. M. Polák, L. Němec, P. Cincibusová, M. Jebavá, J. Brada, M. Trochta: Method for continuous glass melting under controlled convection of glass melt and glass melting furnace for making the same. WO 2014/ 036 979 A1 (2013).
- 40 18. L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Tavičí prostor kontinuální tavičí pece. CZ 31 123 U (2017).
19. L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Tavičí prostor kontinuální sklářské tavičí pece a způsob tavení skla v tomto prostoru. CX 307 659 (2017).
- 45 20. L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Schmelzram eines kontinuierliches Glasschmelzofens und nach einem darin aufgeföhrten Verfahren erhaltene Glasschmelze. DH 20 2018 105 160 U1 (2019).
- 50 21. L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Schmelzram eines kontinuierliches Glasschmelzofens und nach einem darin aufgeföhrten Verfahren erhaltene Glasschmelze. DH 10 2018 122 017 A9 (2019).

NÁROKY NA OCHRANU

5

1. Sklářská tavící pec s konverzním regionem (1) na přeměnu sklářské vsázky (5) na skelnou taveninu (13), zahrnuje:

10

konverzní region (1) s vrstvou sklářské vsázky (5) na roztavené skelné tavenině (13), který obsahuje dno (7), protilehlé boční stěny (10) a čelní stěnu (14), je opatřený dvěma bočními vstupy (2) a je otápěný topnými clekrodami (3) a plynovými hořáky (4); a

15

na konverzní region (1) navazující homogenizační region (6), který je optápěný celoelektricky pro homogenizaci skelné taveniny (13),

vyznačující se tím, že konverzní region (1):

a) je opatřen na každé protilehlé boční stěně (10) bočním vstupem (2);

20

b) je osazený tyčovými vertikálními elektrodami (3) umístěnými ve dnu (7) a vertikálními plynovými hořáky (4) umístěnými v klenbě (8);

b) má rozmístěny topné tyčové vertikální elektrody (3) po celé ploše dna (7) a vertikální plynové hořáky (4) po celé ploše klenby (8) v pravidelných formacích;

25

c) má osy (9) vertikálních elektrod (3) uspořádaných v minimálním odstupu 0,3 m od sebe a od stěn (10, 14);

30

e) má osy (11) vertikálních hořáku (4) uspořádané v minimálním odstupu 0,5 m od sebe a od stěn (10, 14); a

f) má špičky (12) elektrod (3) vzdáleny od spodního povrchu vrstvy sklářské vsázky (5) maximálně 0,4 m.

35

2. Sklářská tavící pec podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že konverzní region (1) má podíl elektrické energie topných elektrod (3) k celkové energii dodané do konverzního regionu (1) topnými elektrodami (3) a hořáky (4) alespoň 50 %.

40

3. Sklářská tavící pec podle nároku 1 až 2, **vyznačující se tím**, že topné vertikální elektrody (3) s délkou dosahující bezprostředně k povrchu sklářské vsázky (5), jsou tyčové molybdenové elektrody (3).

45

4. Sklářská tavící pec podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že topné vertikální plynové hořáky (4) jsou otápěny zemním plynem se vzduchem nebo kyslíkem.

5. Sklářská tavící pec podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že topné vertikální plynové hořáky (4) jsou otápěny vodíkem se vzduchem nebo kyslíkem.

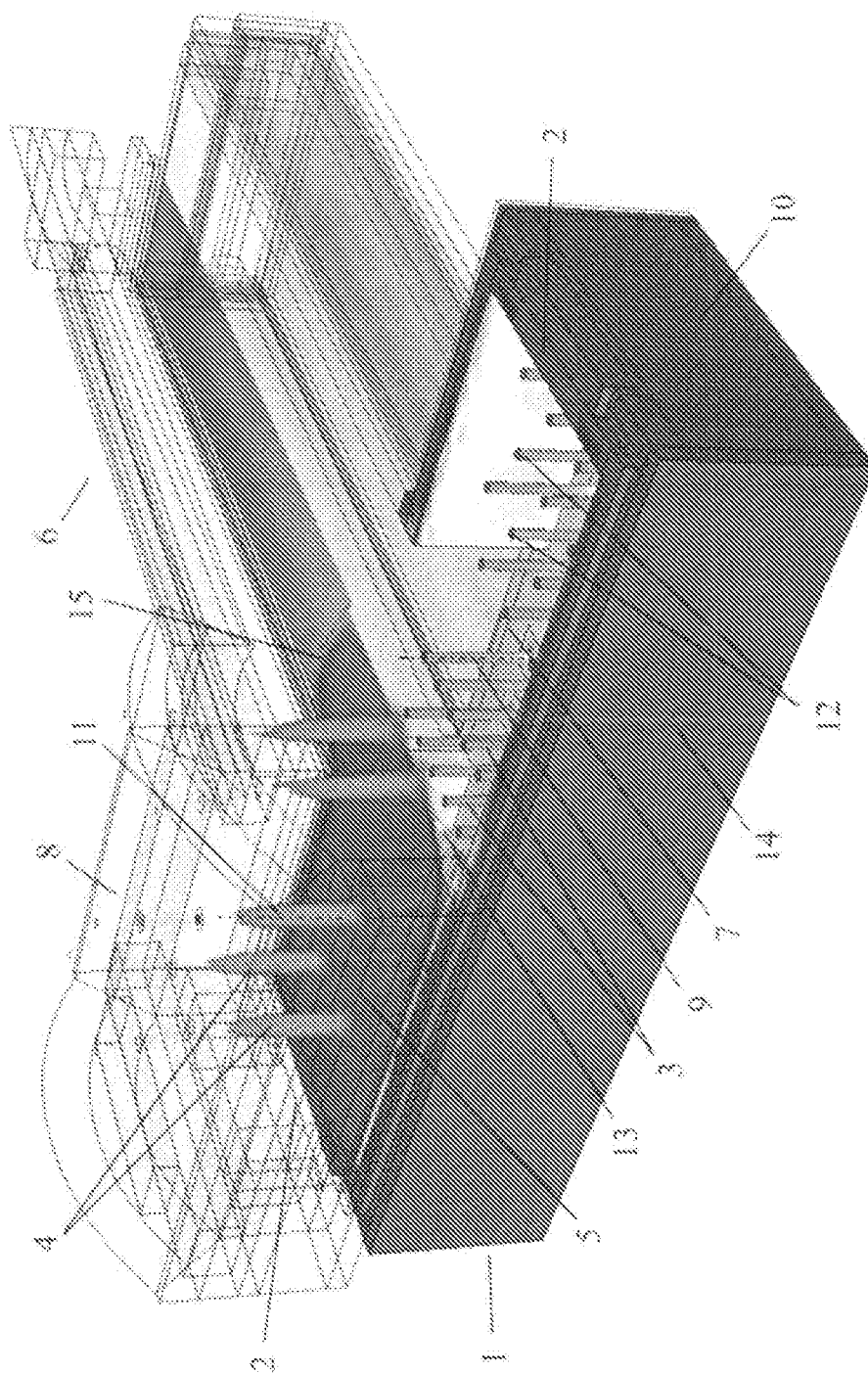
50

6. Sklářská tavící pec podle některého z nároku 1 až 5, **vyznačující se tím**, že konverzní region (1) má maximální koncentraci topné energie elektrodami (3) a plynovými hořáky (4) 6 000 až 14 000 kW.

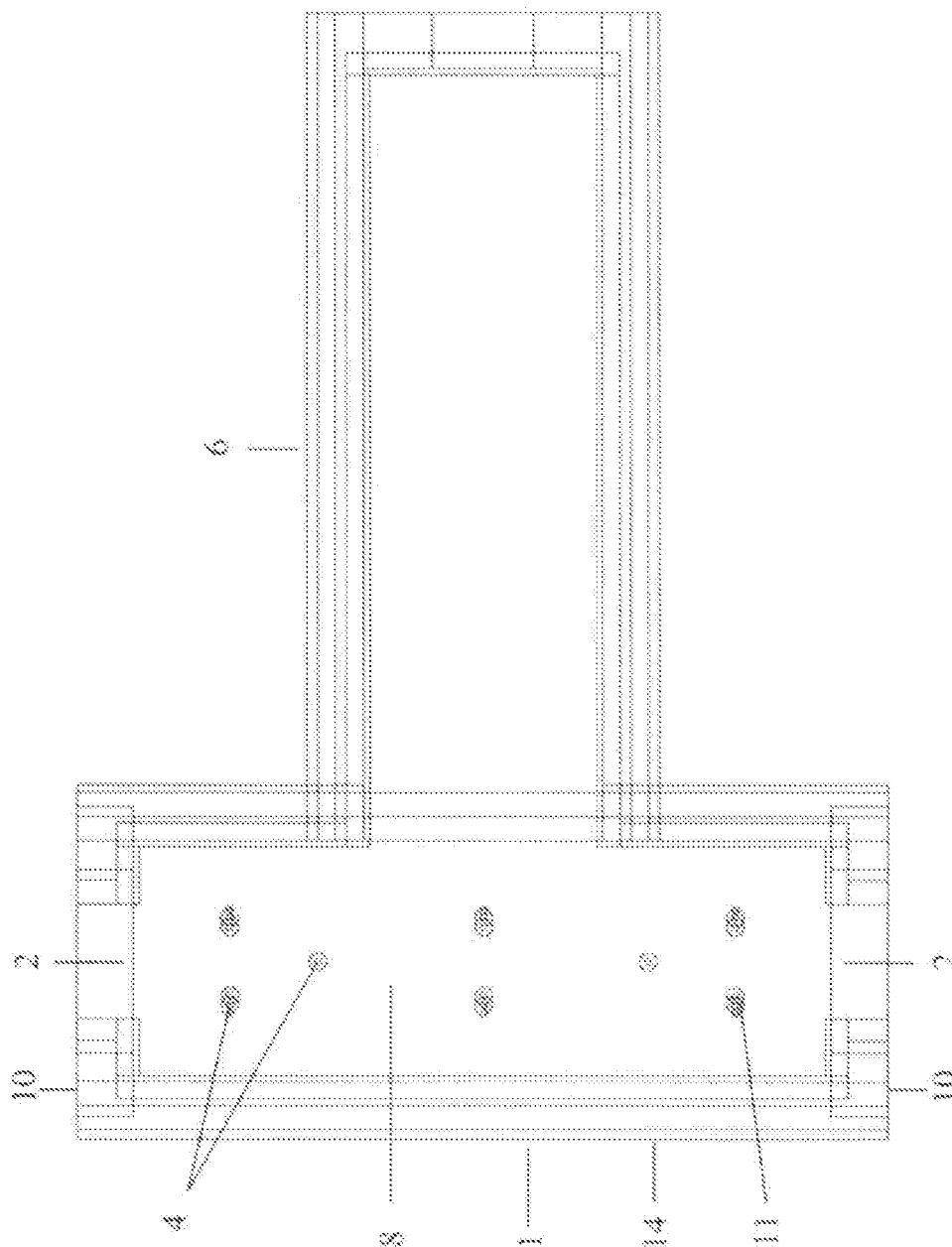
19 výkresů

Seznam vztahových značek:

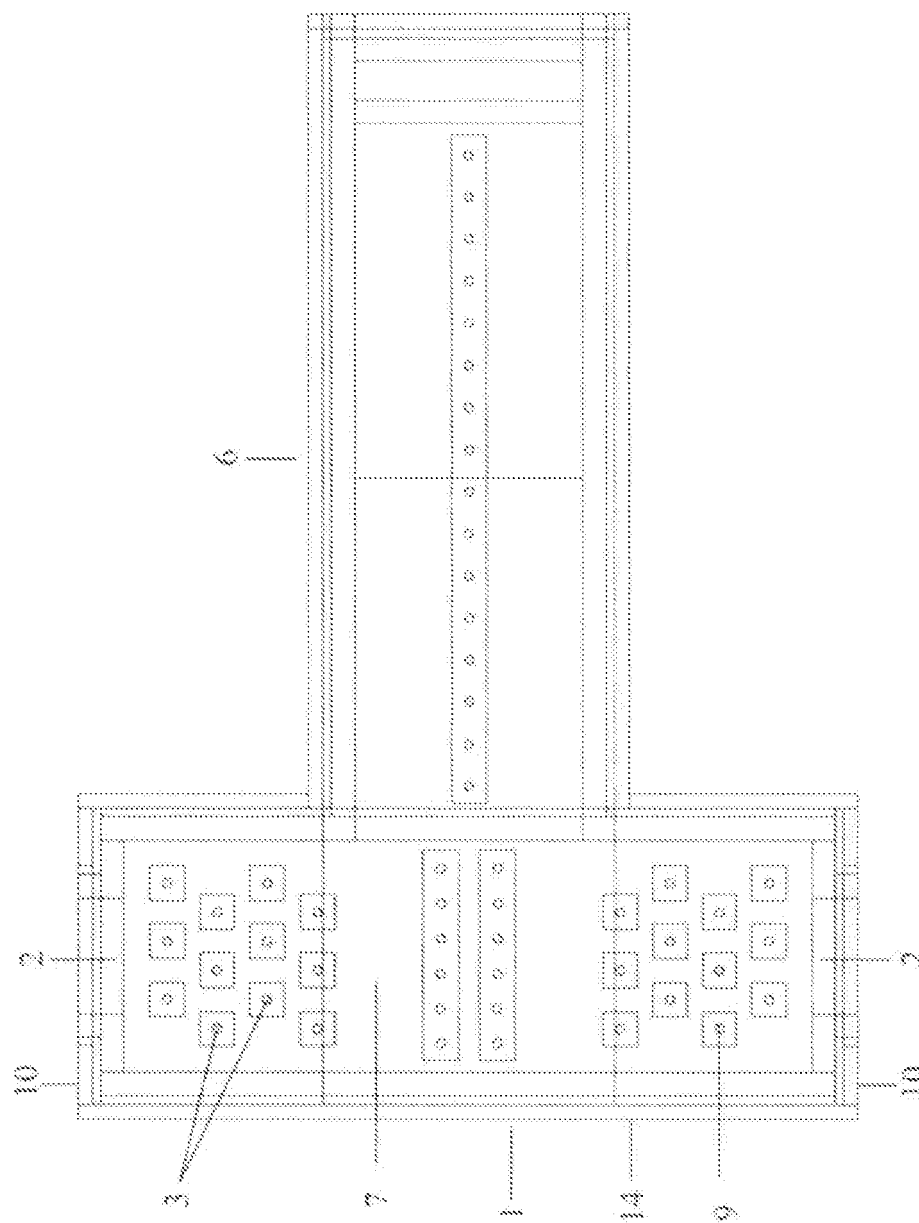
- 1 konverzní region
- 2 boční vstupy 2 do konverzního regionu 1
- 3 elektrody
- 4 plynové hořáky
- 5 sklářská vsázka
- 6 homogenizační region
- 7 dno 7 konverzního regionu 1
- 8 klenba 8 konverzního regionu 1
- 9 osy 9 elektrod 3
- 10 boční stěny 10 konverzního regionu 1
- 11 osy 11 hořáků 4
- 12 špičky 12 elektrod 3
- 13 skelná tavenina
- 14 čelní stěna konverzního regionu 1
- 15 hranice 15 sklářské vsázky 5.



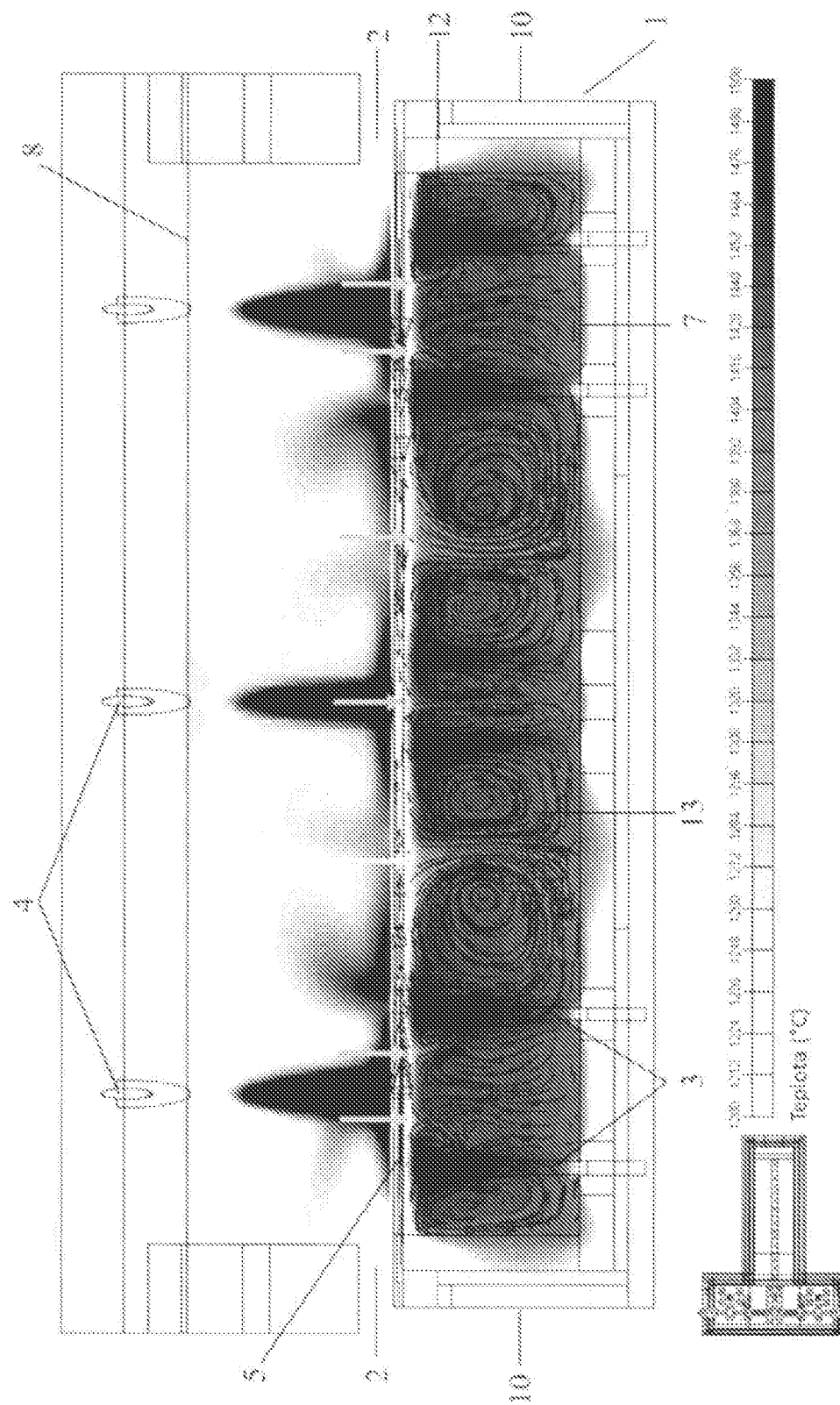
Obr. 1



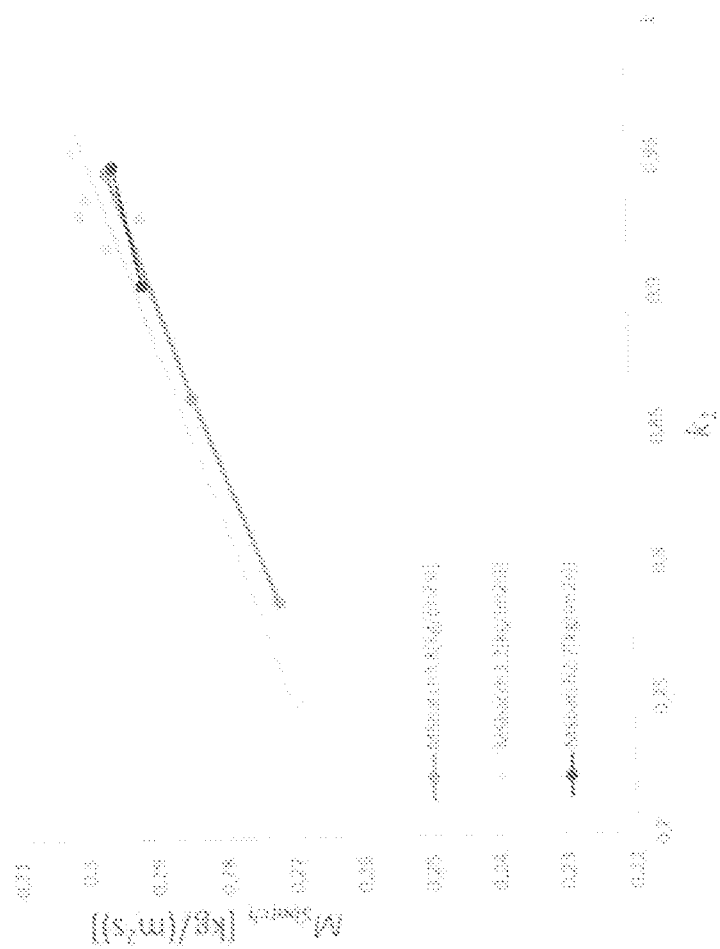
Obr. 2



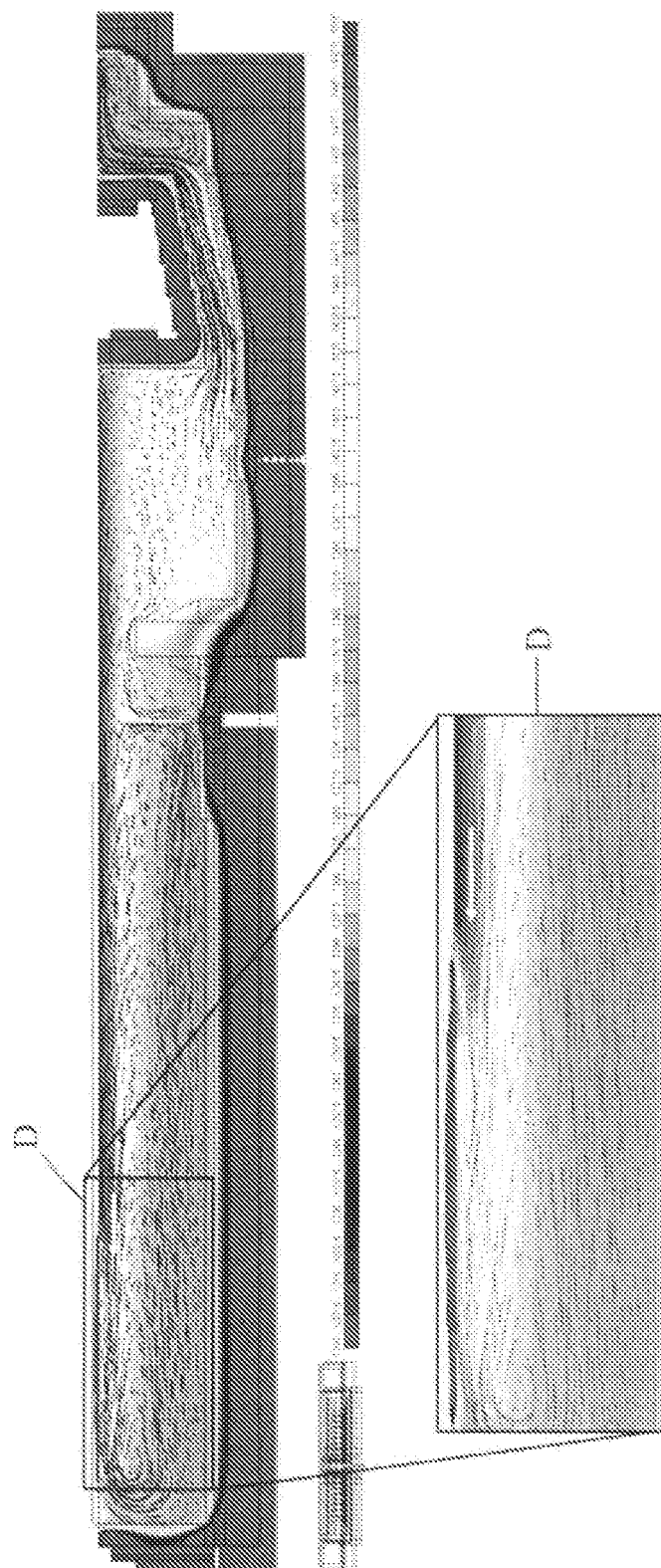
Obr. 3



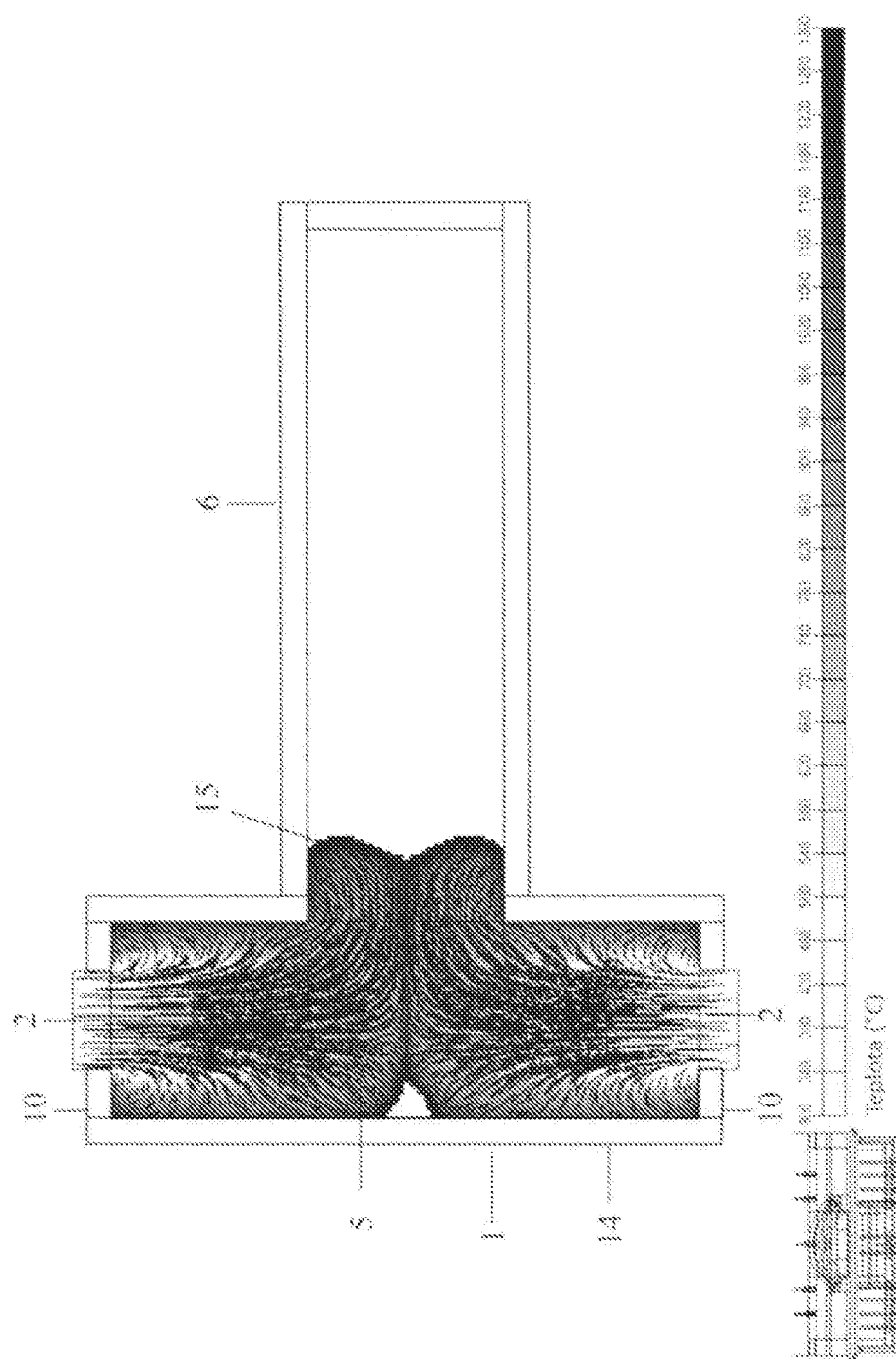
Obr. 4



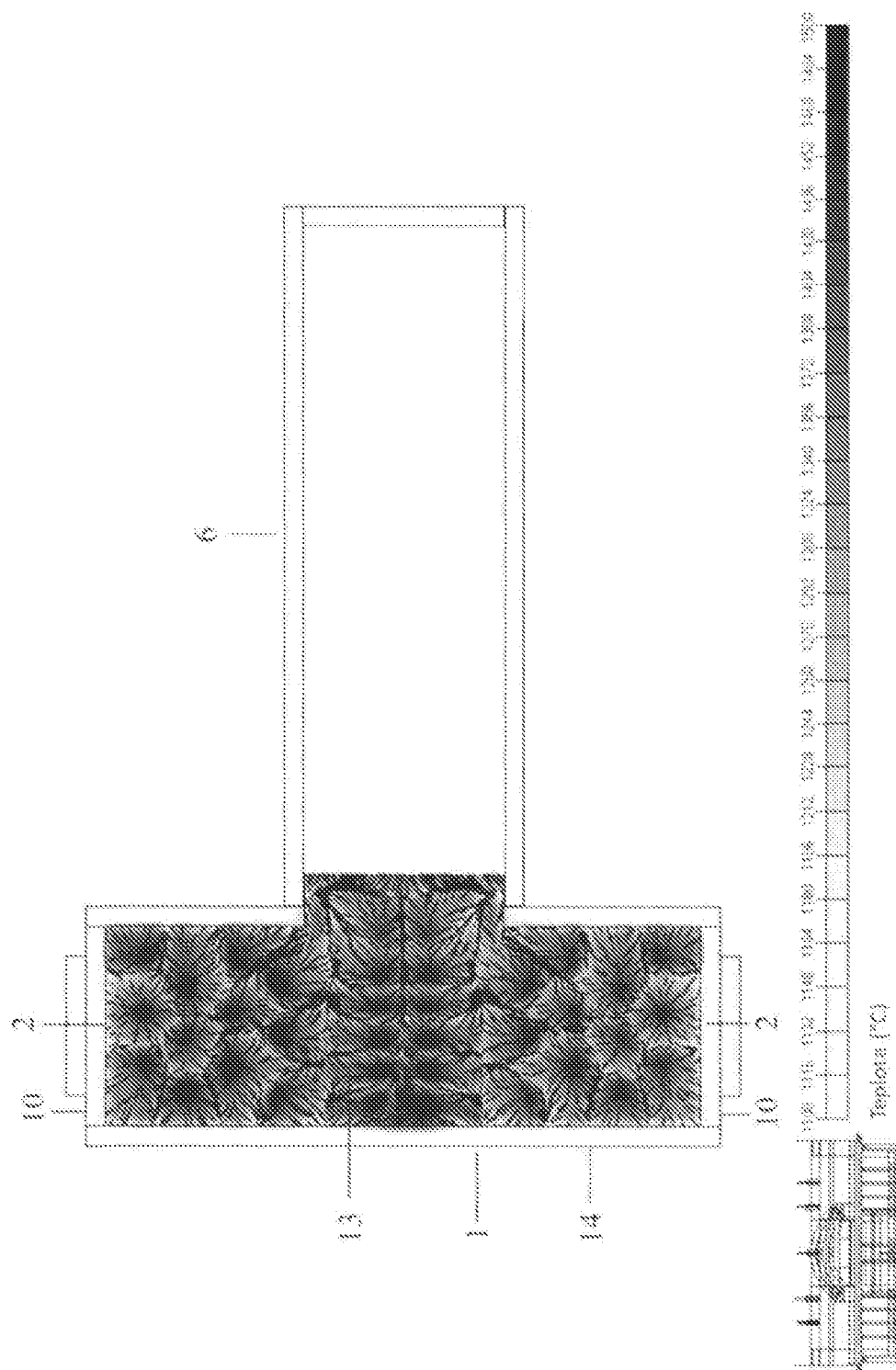
Obr. 5



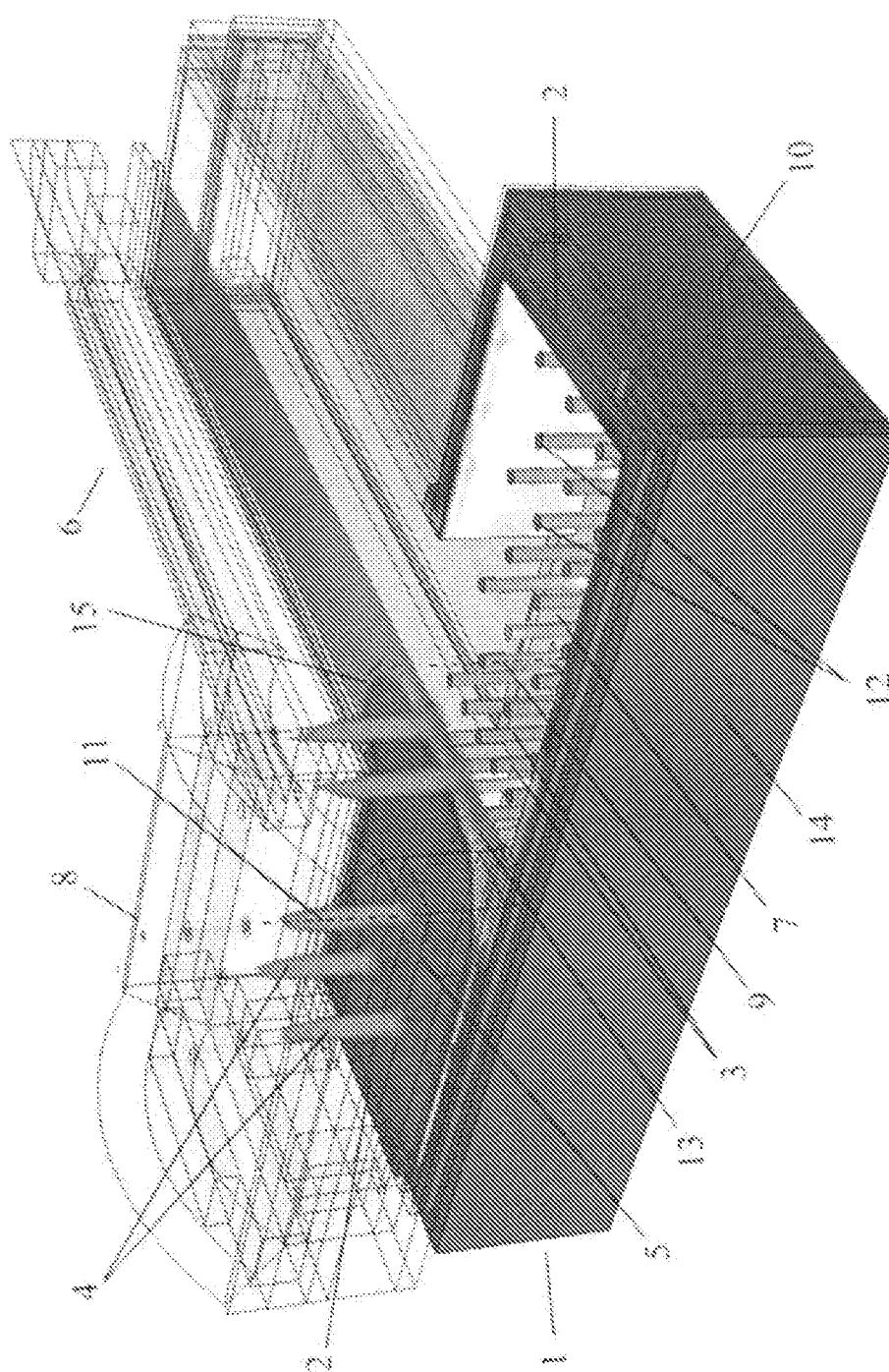
Obr. 6



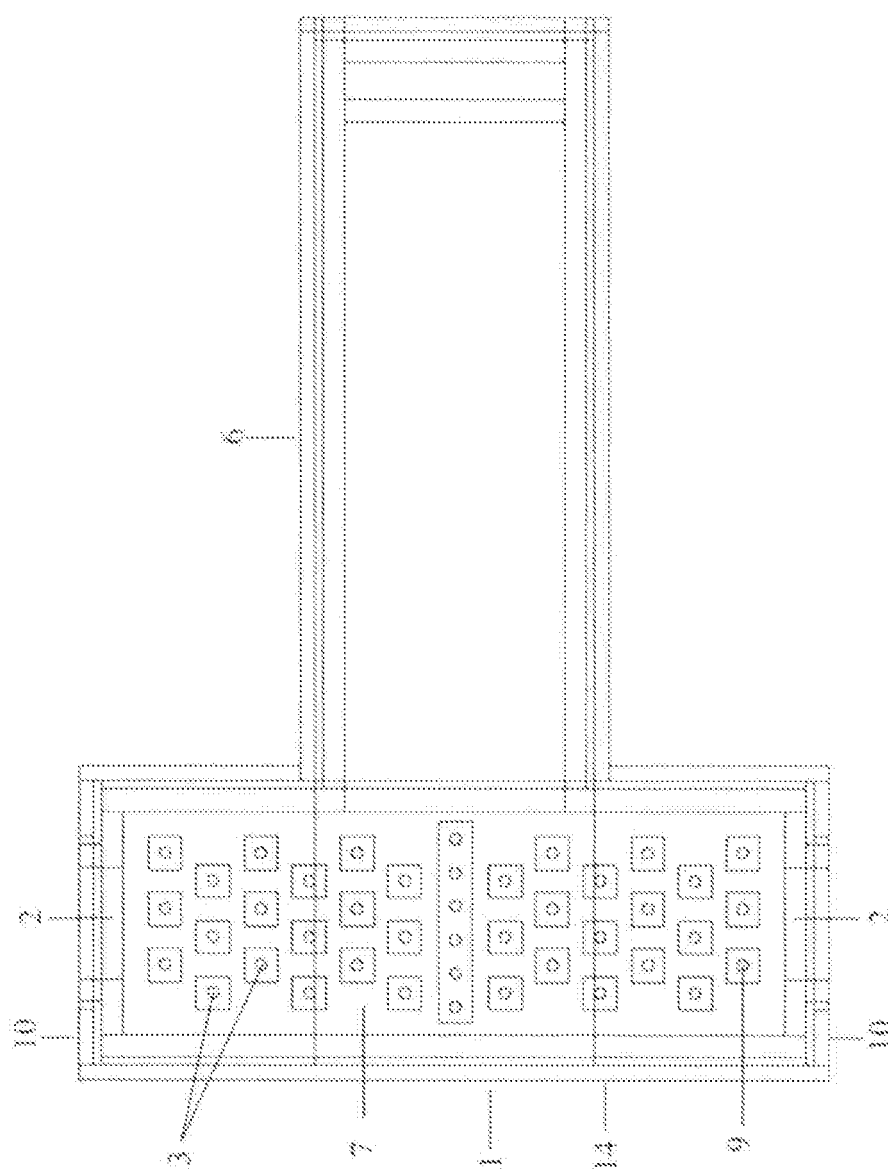
Obr. 7



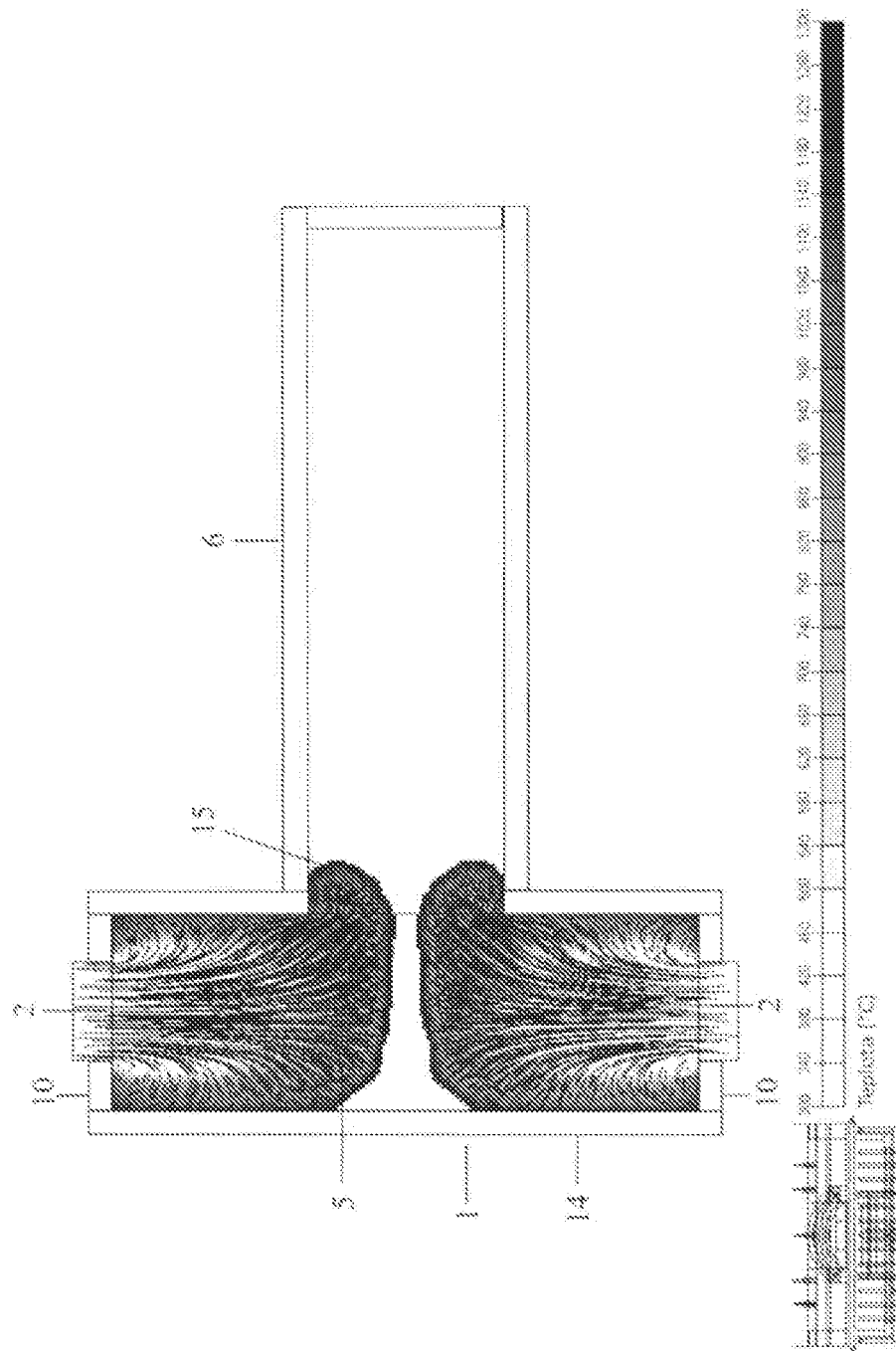
Obr. 8



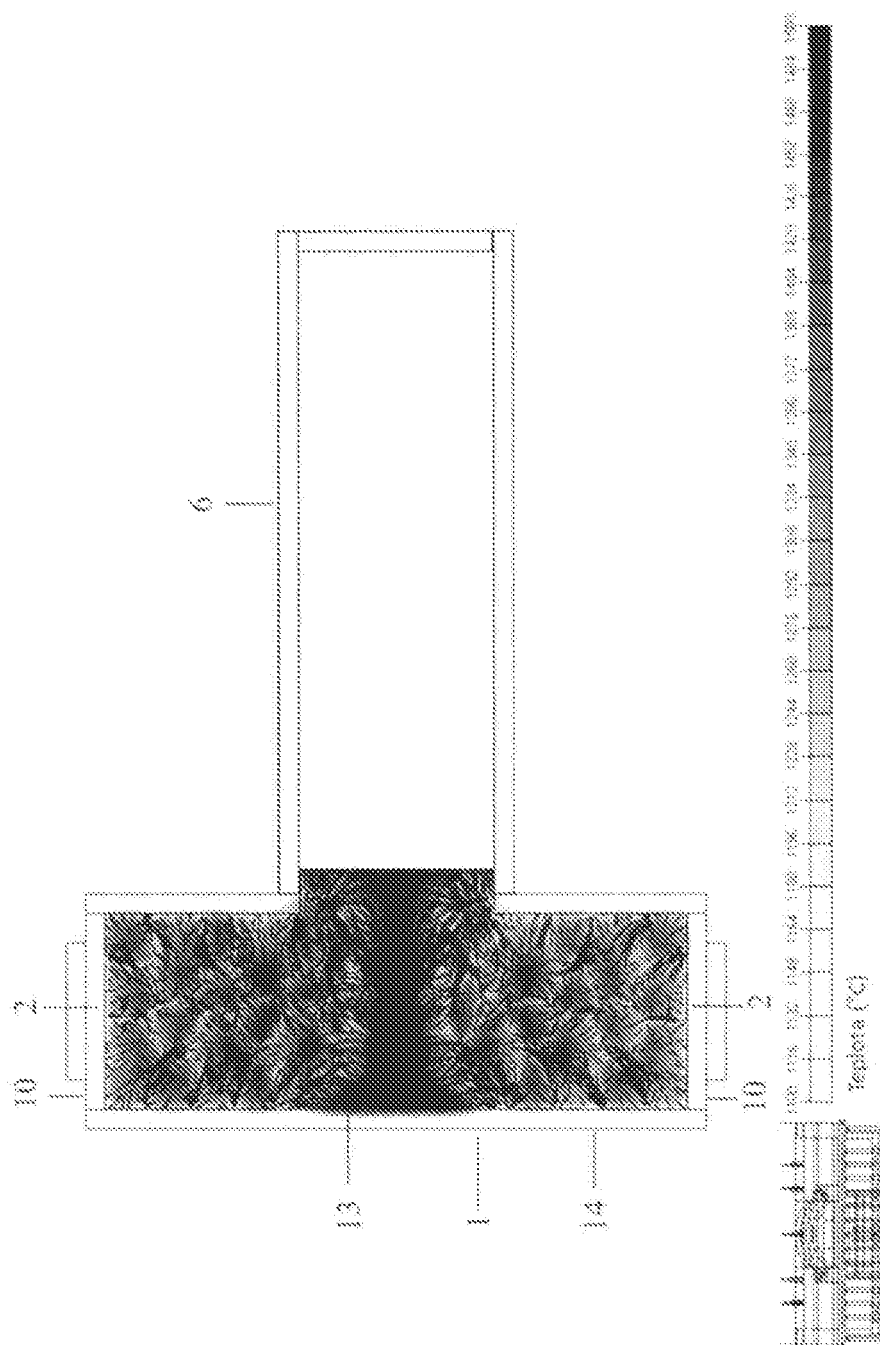
Obr. 9



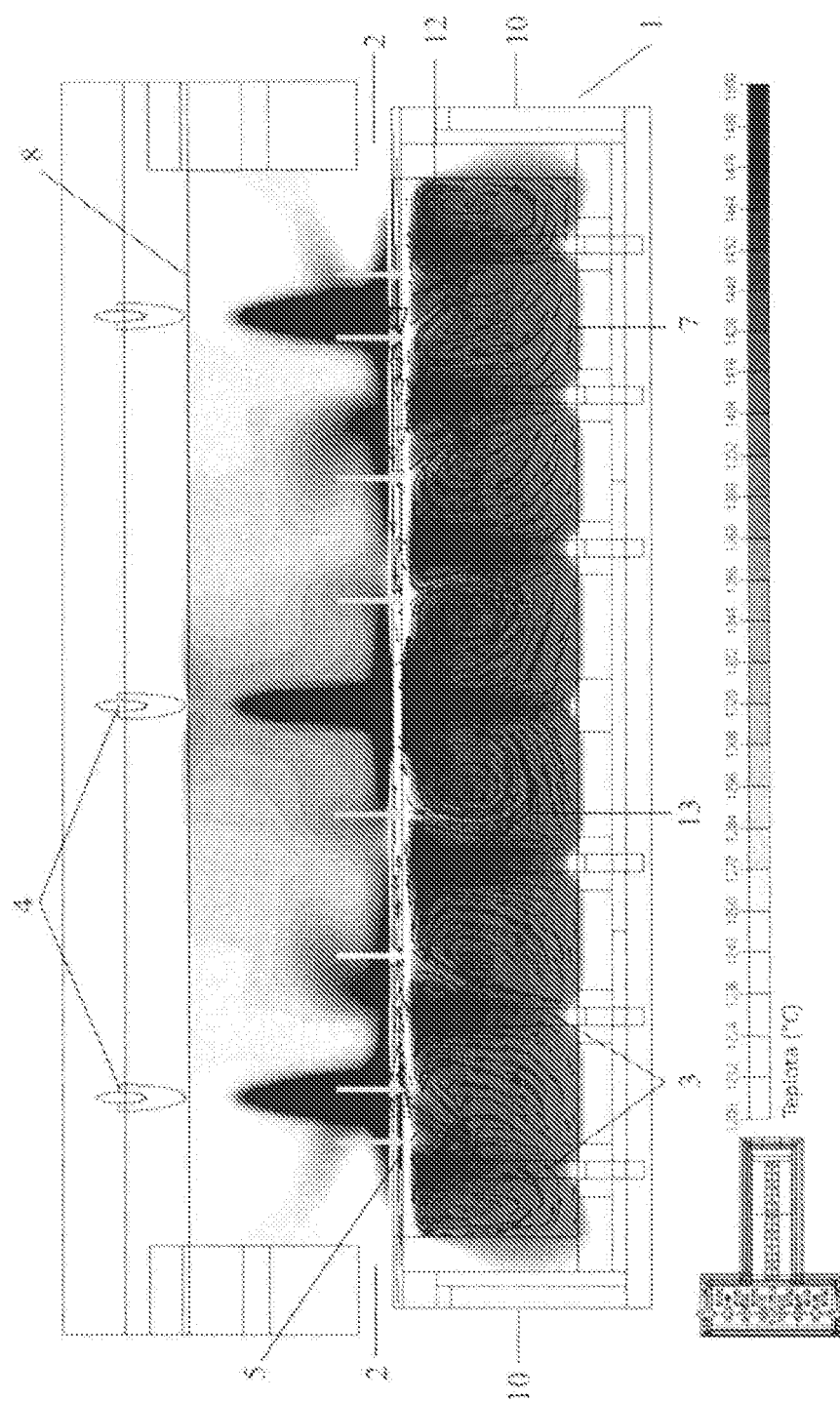
Obr. 10



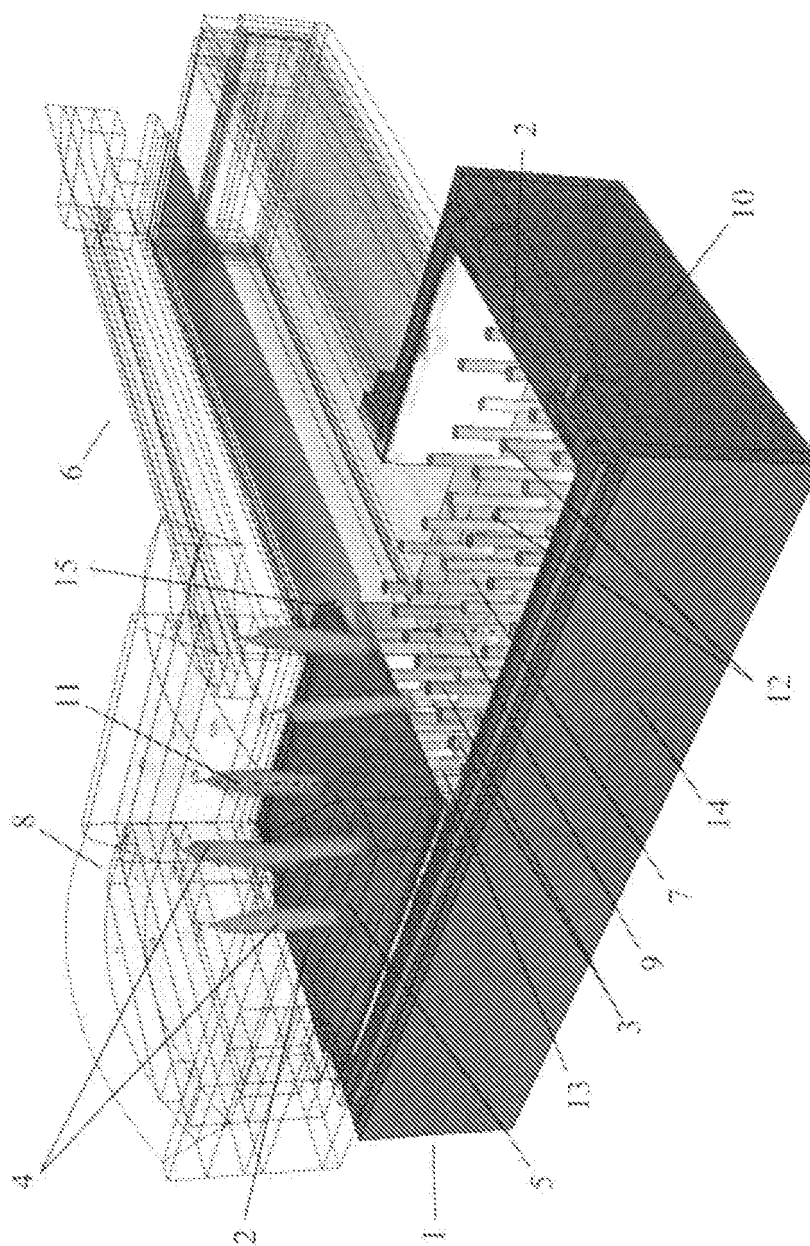
Obr. 11



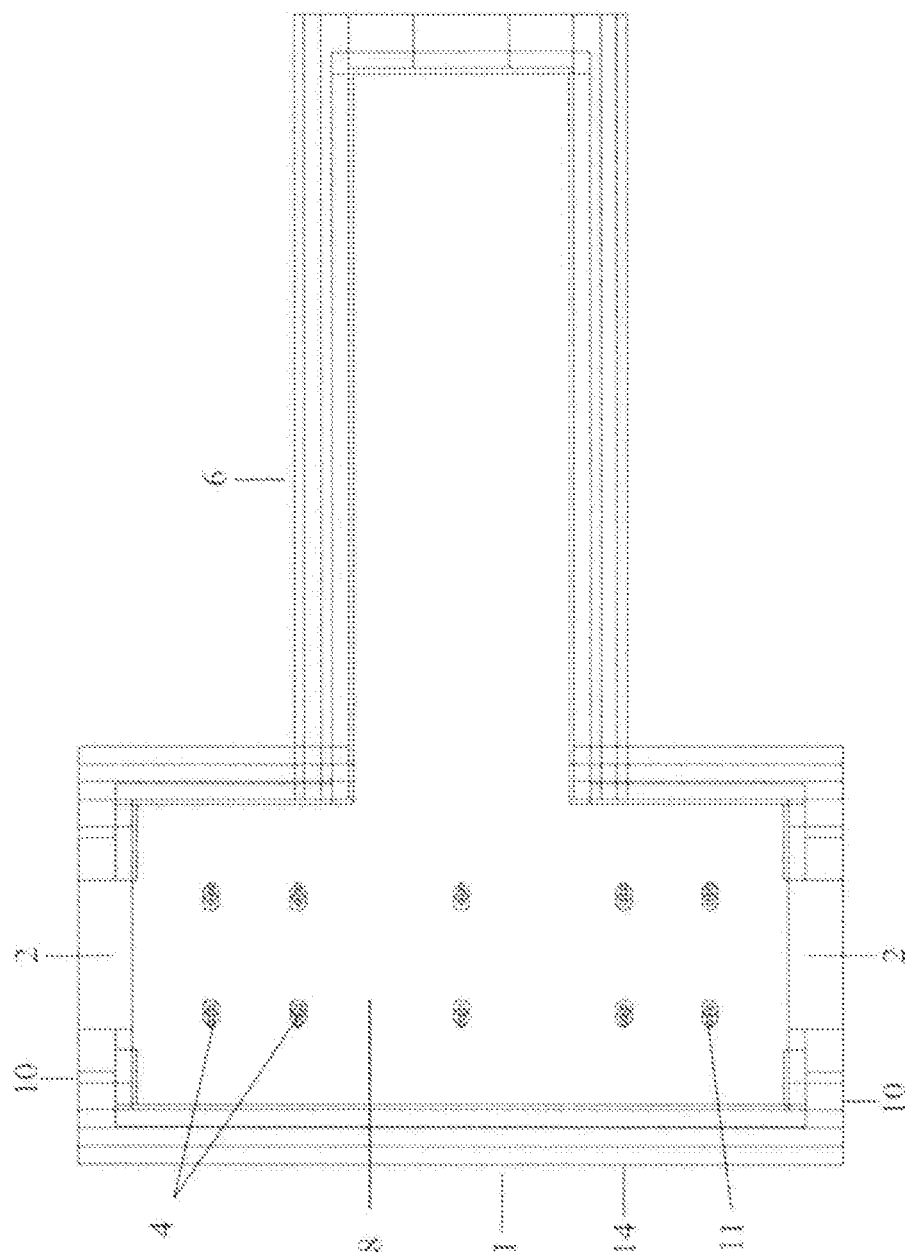
Obr. 12



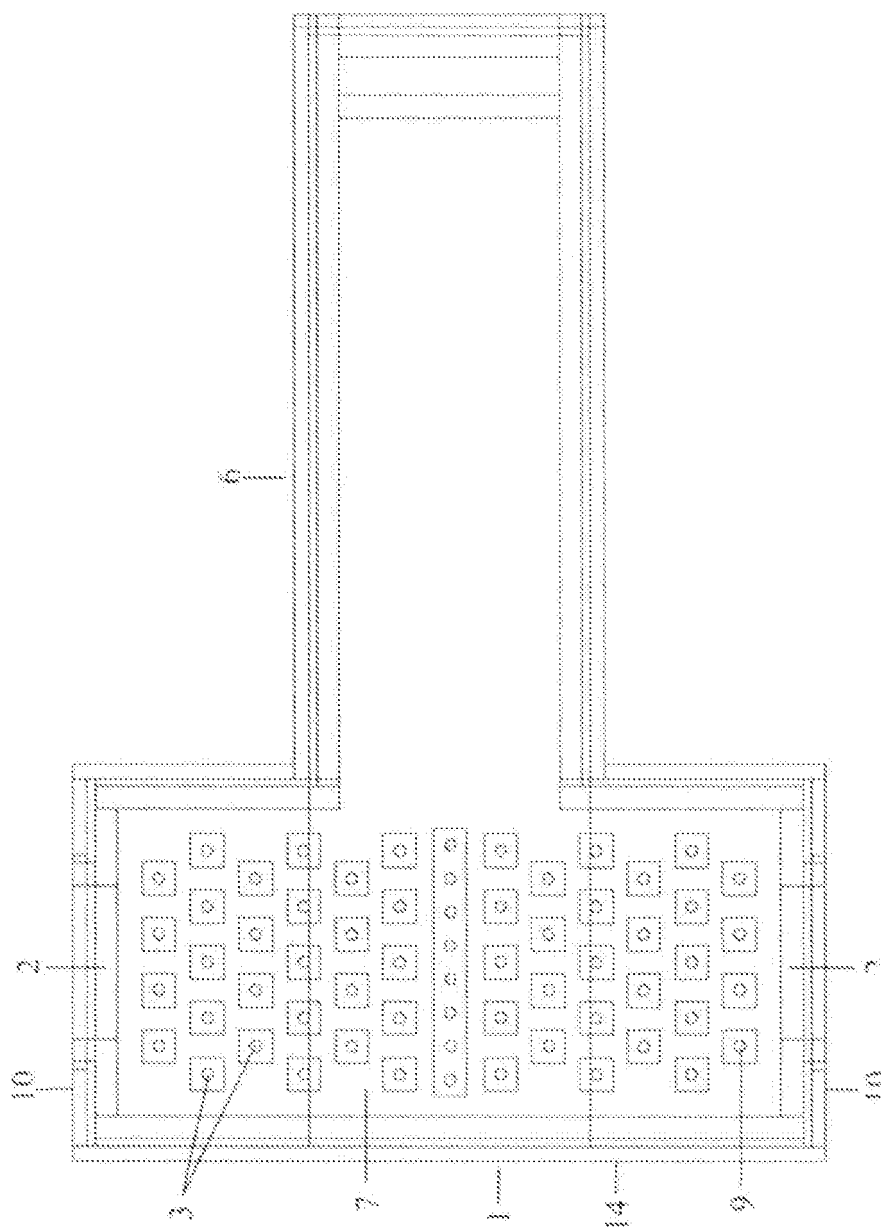
Obr. 13



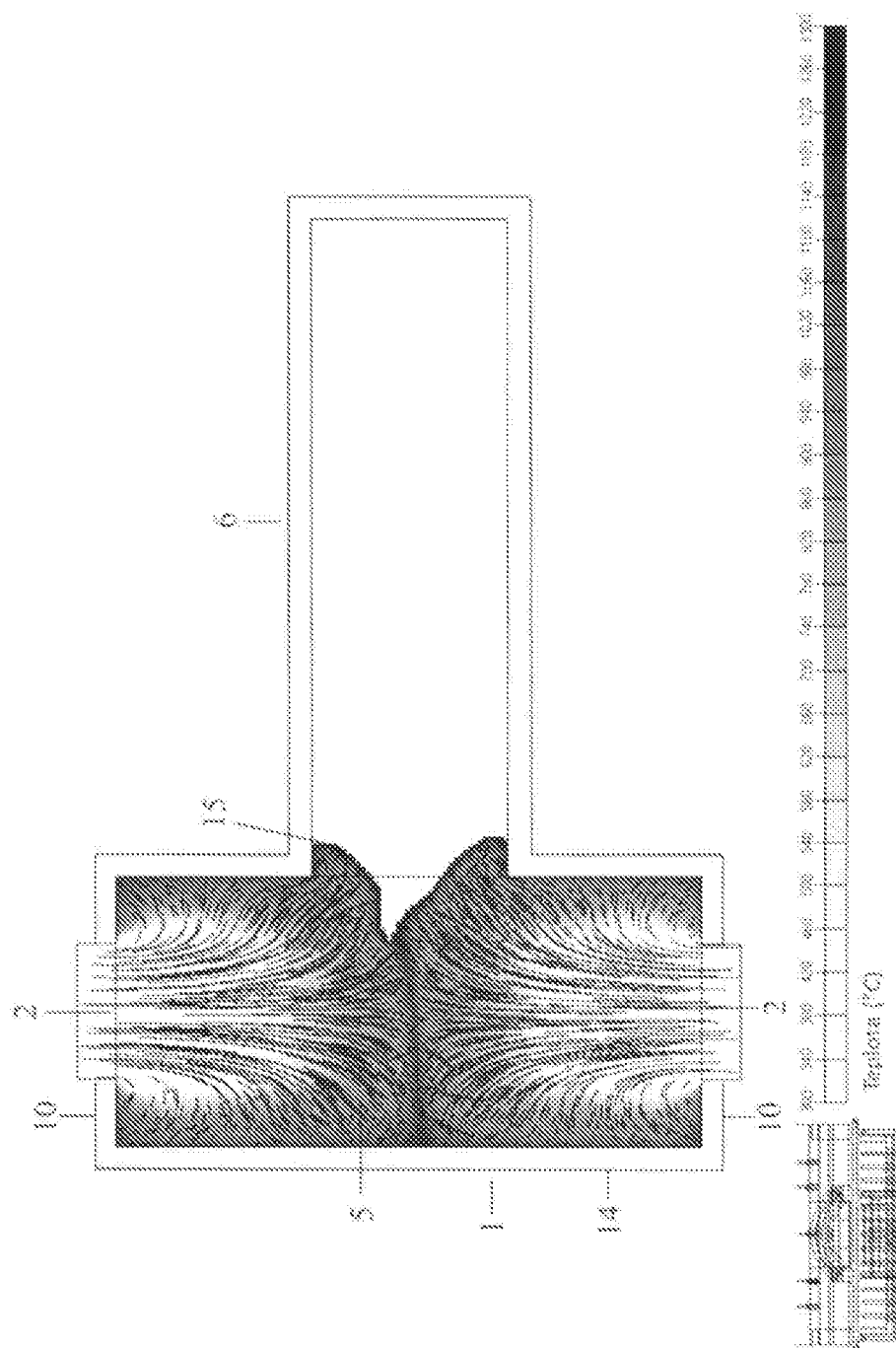
Obr. 14



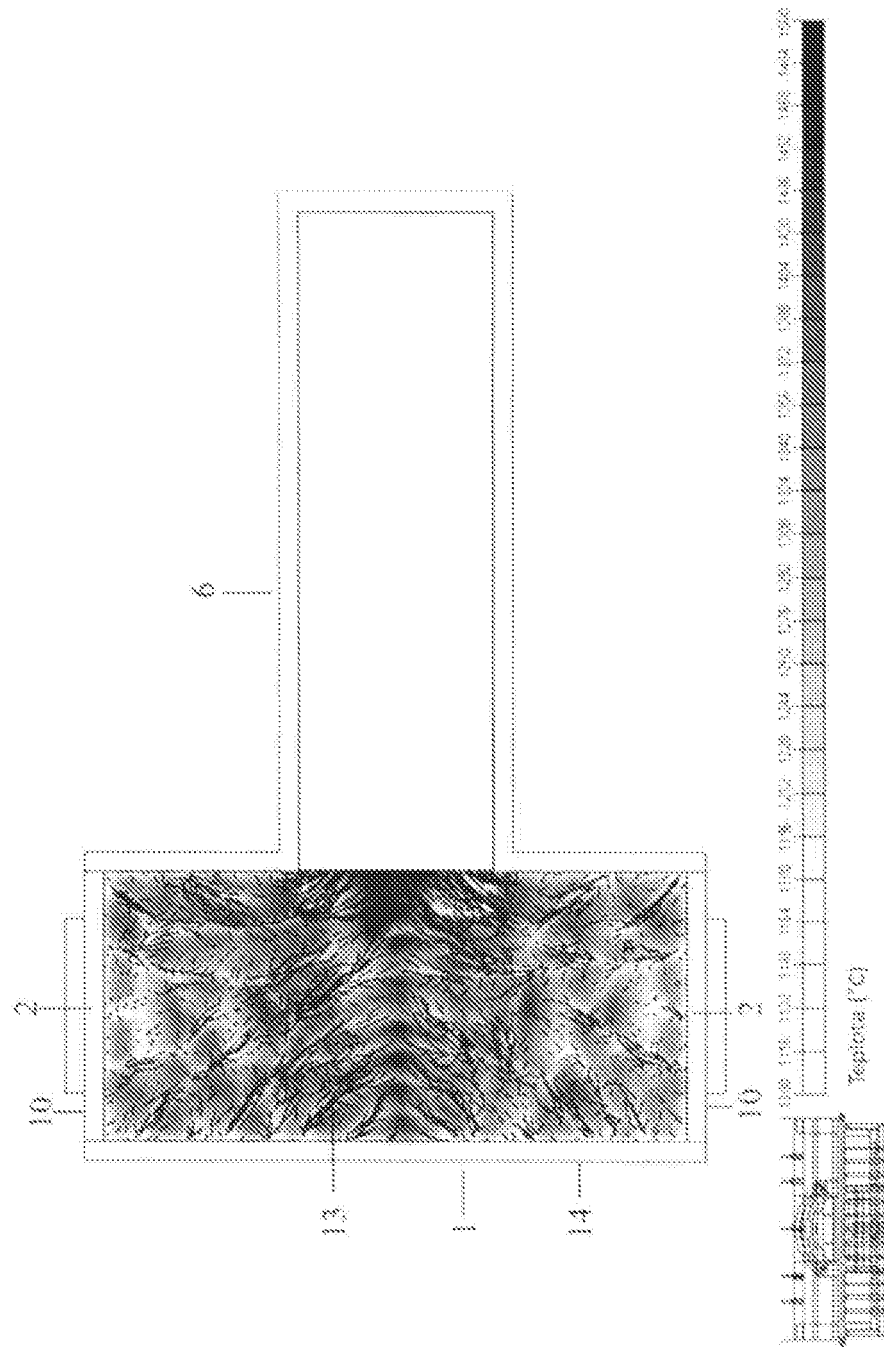
Obr. 15



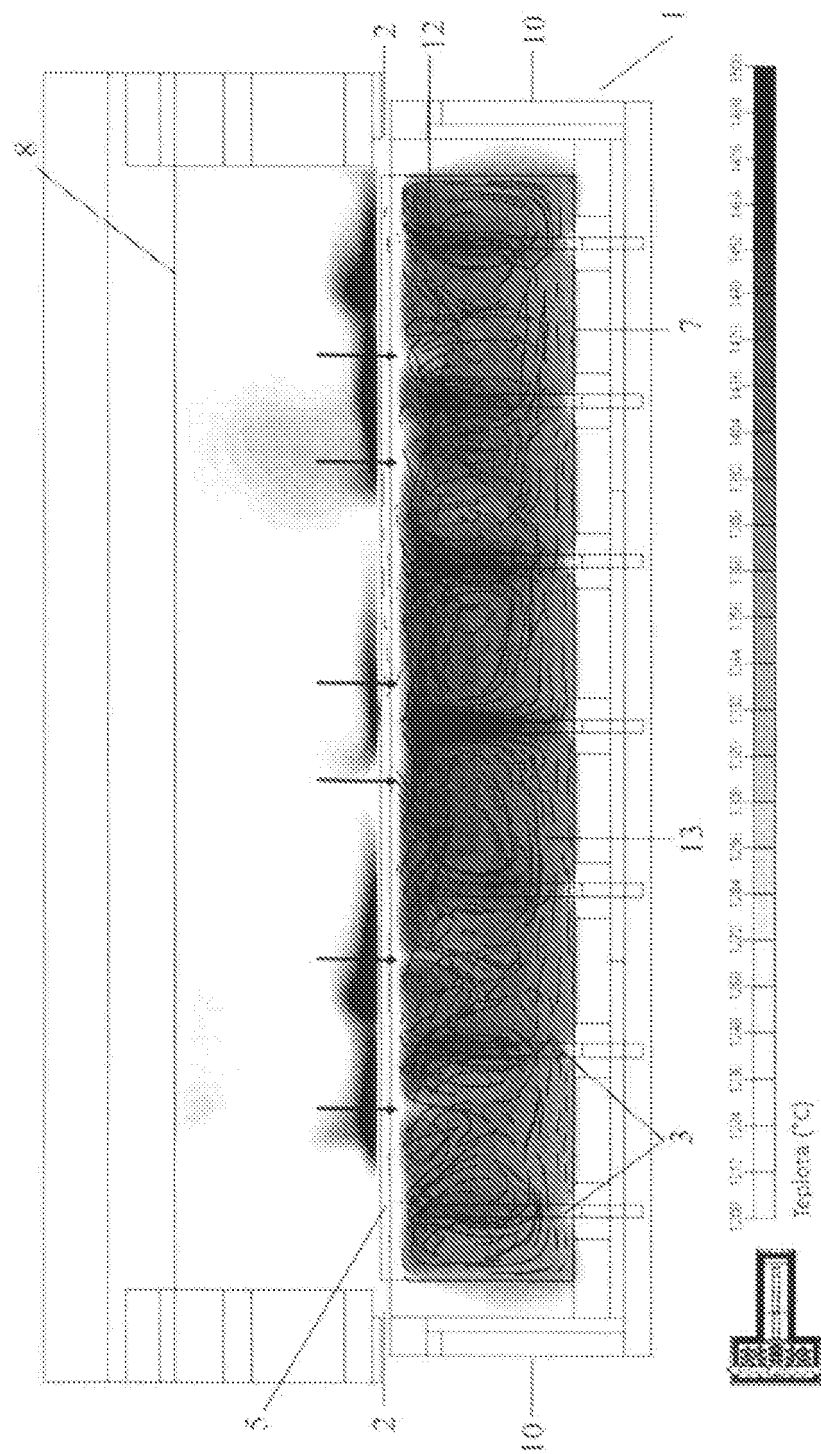
Obr. 16



Obr. 17



Obr. 18



Obr. 19