

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

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

(21) Číslo dokumentu:

2012-16

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

C03B 5/18 (2006.01)

C03B 5/187 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **11.01.2012**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **04.09.2013**
(Věstník č. 36/2013)

(71) Přihlašovatel:

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 6,
CZ

Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., Praha
8, CZ

GLASS SERVICE, a.s., Vsetín, CZ

(72) Původce:

Němec Lubomír Prof. Ing. DrSc., Praha 1, CZ

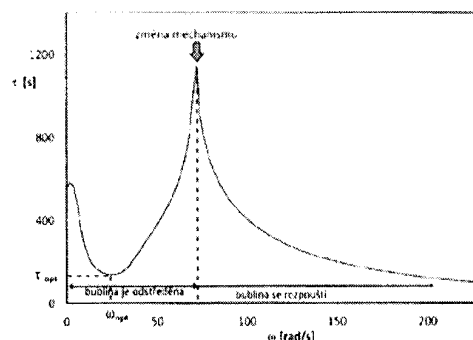
Kloužek Jaroslav Doc. Ing. CSc., Senohraby, CZ

Tonarová Vladislava Ing. Ph.D., Žďár nad Sázavou, CZ

Jebavá Marcela Ing. Ph.D., Odolena Voda, CZ

(74) Zástupce:

Ing. Marie Smrčková, patentový zástupce, Velflíkova 10,
Praha 6, 16000



(54) Název přihlášky vynálezu:

Způsob čerání skloviny odstředováním

(57) Anotace:

Čerání skloviny (7) odstředováním separací bublin ze skloviny (7), aniž by přitom docházelo k rozpuštění bublin ve sklovině (7), se provádí ve sklovině (7) o teplotě 1000 až 1600 °C, s výhodou 1200 až 1500 °C, v rotujícím tělese (1) čerací odstředivky. Celkový vnitřní prostor V_0 rotujícího tělesa (1) je částečně naplněný sklovinou (7) určenou k čerání o obsahu V , je spojený s okolní atmosférou pro únik bublin ze skloviny (7) a vykazuje střední poloměr r_0 v rozmezí 0,05 až 1 m a celkovou výšku h_0 v rozmezí 0,1 až 1,5 m. Podíl obsahu V rotujícího tělesa (1) naplněného sklovinou (7) určenou k čerání je ku celkovému vnitřnímu obsahu V_0 rotujícího tělesa (1) v poměru $V/V_0=0,20$ až 0,80. Čerání skloviny (7) se provádí za následných podmínek, a to při otáčkách rotujícího tělesa (1) čerací odstředivky při odstředování v rozmezí 10 až 200 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; při průměrné rychlosti růstu bublin v odstředované sklovině (7) v rozmezí $5\times 10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $5\times 10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, s výhodou $1\times 10^{-7}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $5\times 10^{-6}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; až do odstranění nejmenších bublin o poloměru v rozmezí $5\times 10^{-5}\text{m}$ až $1\times 10^{-4}\text{m}$. Tím se dosáhne toho, že celková doba odstředění i nejmenších bublin o poloměru v rozmezí $5\times 10^{-5}\text{m}$ až $1\times 10^{-4}\text{m}$ se pohybuje v časovém intervalu desítek až tisíc sekund.

Způsob čerení skloviny odstředováním

Oblast techniky

5 Vynález se týká způsobu čerení skloviny odstředováním, při němž se účinkem odstředivé síly provádí separace bublin ze skloviny. Způsob se provádí v zařízení, zahrnující nejméně jednu čerící odstředivku, obsahující rotující těleso válcovitého tvaru s obvodovým pláštěm, dnem a případně víkem, vykazující osovou symetrii v ose rotace rotujícího tělesa. Rotující těleso je vybaveno prostředky pro nátok a výtok skloviny.

10

Dosavadní stav techniky

Proces odstraňování bublin při tavení skel, nazývaný čerení, je obvykle procesem nejpomalejším, který vyžaduje vysoké teploty, dlouhé časy a použití často toxických nebo ekologicky nežádoucích komponent sklářské tavicí směsi. Přitom i malé množství bublin ve skle je z hlediska jeho kvality nepřijatelné. Snaha urychlit tento proces a dosáhnout vysoké kvality skel, stejně jako snaha podstatně snížit spotřebu energie, vedla k použití čerících činidel (dnes nečastěji používanými jsou oxid antimonitý kombinovaný s oxidovadlem a síran sodný kombinovaný často s redukčním činidlem), a případně dalších způsobů, kterými se proces odstraňování bublin urychlí. Vedle tradičního chemického účinku čeriv, které uvolňují ze skla do bublin plyny, a zvětšují tak rozměr bublin, a ty v důsledku vztlačkové síly rychle stoupají k hladině, používá se i sycení taveniny rychle difundujícími plyny jako helium, nebo se využije dalšího prostředku, který buď sám, nebo v kombinaci s gravitační silou, urychluje separaci bublin od taveniny. Takovou dalším prostředkem je např. použití ultrazvuku, který podporuje růst bublin i jejich koalescenci [1]. Jinou možností je upravení tvaru a proudění v tavicím prostoru tak, aby bubliny v gravitačním poli měly co nekratší nebo nejsnazší cestu k hladině [2,3].

V nedávné minulosti byly učiněny pokusy využít pro separaci bublin ze skloviny odstředivé síly, v analogii s odstředováním emulzí a suspenzí. Tento proces je ovšem třeba chápat spíše jako dostředování, neboť bubliny jako inkluze velmi malé hustoty se v odstředivém poli pohybují směrem ke středu rotace. Předpokládá se rychlý a dokonalý separační proces, avšak výsledky obou způsobů nebyly často dokonalé. Skla byla obvykle zbavena větších bublin, avšak obsahovala často i značné množství bublin malých a prachových, jejichž odstranění se nedařilo ani změnou parametrů odstředovacího procesu, nejčastěji zvýšením otáček. Při použití vysokých otáček pak přistoupily i náročné požadavky na pevnost rotujícího zařízení vzhledem k vysokému tlaku na jeho plášť.

Využití odstředivé síly bylo vyzkoušeno již dříve v některých firmách, zejména se jím, podle podaných patentů, zabývala firma Owens Illinois, Inc. z Ohia, US. Existuje několik jejich patentů zabývajících se čerčením skloviny v odstředivém poli.

Patent US 3 819 350 majitele Owens-Illinois, Inc., US, publikovaný 25.6.1974, popisuje
5 metodu a zařízení určené k rychlému tavení a čerčení skloviny. Jedná se zde o modulový systém, který má za úkol značně urychlit celý proces tavení a homogenizace a tím celou výroby skla urychlit a zlevnit.

První částí zařízení je tavicí agregát. Sem je přiváděn kmen, je ohříván a taven.
Vznikající směs taveniny a kmene je promíchávána míchadlem. Vzniká utavená sklovina
10 obsahující neroztavená zrnka písku, šlíry a velké množství bublin.

Tato tavenina je přivedena do druhé části zařízení. Ve druhém agregátu jsou umístěny topné elektrody a míchací zařízení. Zde je sklovina vystavena vyšší teplotě a stříhovému tření díky otáčejícímu se válci uvnitř agregátu. Dojde k rozpuštění křemenných zrn, šlír a k dokončení všech reakcí. V tavenině však stále zůstává velké množství plynných inkluzí.

15 Tato napěněná sklovina je přivedena do třetí části zařízení. Zde je sklovina vystavena odstředivé síle. Dochází k odstraňování bublin a vyčerená a utavená sklovina je vypouštěna ze zařízení ke zpracování.

Využitím tohoto zařízení je možné dosáhnout stejného výkonu tun/den jako v tradičních tavicích zařízeních, avšak se značnou úsporou místa potřebného pro tavicí aparát a doby
20 potřebné k utavení skloviny o přijatelné kvalitě.

Podrobný popis třetího agregátu tohoto zařízení, odstředivky, uvádí patent GB 1 360 916, majitele Owens-Illinois, Inc., US, publikovaný 24.6.1974. Předem utavená sklovina s velkým množstvím bublin je vlita do válce odstředivky. Na vtok skloviny v horní části válce je umístěn talíř s několika otvory. Ten má za úkol rozvádět natékající sklovinu ke
25 stěnám válce odstředivky. Na spodní straně válce je umístěn další podobný kroužek, ovšem s jinak rozmístěnými otvory než je běžné – po obvodu. Má také za úkol odvádět sklovinu zpět ke stěnám válce odstředivky

V preferovaném uspořádání je vzdálenost vrcholu paraboloidu a dna válce minimálně poloviční, lépe stejná, jako délka paraboloidu.

30 Podobně jako v předchozím patentu, též GB 1 416 027 majitele Owens-Illinois, Inc., US, publikovaný 3. 12. 1975. 6.1974, přináší metodu a zařízení pro čerčení taveného skla.

Zařízení je podobné jako v předchozím případě: válec odstředivky s nátokem a horním víčkem s otvory. Rozdílný je výtok skloviny z odstředivky. V tomto případě není výtok skloviny ve středu válce, ale po jeho obvodu výtokovými kanálky.

35 Bylo odzkoušeno několik režimů provozu tohoto zařízení:

- tloušťka vrstvy skloviny je 1 palec (cca 25 mm);
- tloušťka vrstvy skloviny se mění od 0,001 do 1 palce;

- konstantní tloušťka vrstvy skloviny podél celé stěny odstředivky;
- sklo je s i bez přítomnosti čeřiv.

Všechny výše zmiňované postupy a zařízení jsou určeny pro kontinuální provoz a velké výkony tavicích agregátů. Uvedené postupy a zařízení umožňují sice vyčeření skloviny a odstranění velkých bublin, avšak nezbavují sklo prachových bublin, takže čeření skloviny je nedokonalé.

Podstata vynálezu

Uvedené nevýhody se odstraní nebo podstatně omezí způsobem čeření skloviny – taveniny skla - odstředováním, při němž se účinkem odstředivé síly provádí separace bublin ze skloviny, podle tohoto vynálezu. Čeření se provádí v zařízení, zahrnující nejméně jednu čeřící odstředivku, obsahující rotující těleso válcovitého tvaru s obvodovým pláštěm, dnem a případně víkem a vykazující osovou symetrii v ose rotace rotujícího tělesa, které je vybaveno prostředky pro nátok a výtok skloviny. Podstata tohoto vynálezu spočívá v tom, že čeření skloviny odstředováním se provádí separací bublin ze skloviny, aniž by přitom docházelo k rozpuštění bublin ve sklovině, při teplotě skloviny v rozmezí 1000 – 1600 °C, s výhodou 1200 – 1500 °C. Způsob čeření skloviny se provádí v rotujícím tělese čeřící odstředivky. Její celkový vnitřní prostor V_0 je částečně naplněný sklovinou o obsahu V určenou k čeření, a je spojený s okolní atmosférou za účelem úniku bublin ze skloviny. Celkový vnitřní prostor V_0 vykazuje střední poloměr r_0 v rozmezí 0,05 – 1 m a celkovou výšku h_0 v rozmezí 0,1 – 1,5 m. Podíl obsahu V rotujícího tělesa naplněného sklovinou určenou k čeření k celkovému vnitřnímu obsahu V_0 rotujícího tělesa je v poměru $V/V_0 = 0,20 \text{ -- } 0,80$.

Čeření skloviny se provádí při otáčkách rotujícího tělesa čeřící odstředivky při odstředování v rozmezí 10 – 200 rad.s^{-1} . Důležitou podmínkou optimálního způsobu čeření skloviny odstředováním bublin ze skloviny je splnění podmínek průměrné rychlosti růstu bublin v odstředované sklovině, a to v rozmezí $5 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1} \text{ -- } 5 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, s výhodou $1 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1} \text{ -- } 5 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$, přičemž tyto hodnoty byly získány experimentálně. Do rozsahu průměrné rychlosti růstu bublin spadá i čeření za přítomnosti čeřících přísad. Čeření skloviny odstředováním se provádí až do doby, kdy dojde k odstranění nejmenších nejmenších bublin o poloměru $5 \times 10^{-5} \text{ m}$ až $1 \times 10^{-4} \text{ m}$.

Hlavní výhodou tohoto vynálezu je, že při čeření skloviny odstředováním, dochází k separaci bublin, aniž by se bubliny ve sklovině rozpouštěly. Při optimálním vedení čeření skloviny odstředováním, při nárokováném rozmezí poloměru a výšky vnitřního prostoru rotujícího tělesa čeřící odstředivky, jeho definovaném naplnění sklovinou a při nárokováném rozmezí otáček rotujícího tělesa, lze v překvapivě krátké době dosáhnout odstředování bublin ze skloviny, v časovém intervalu desítek až tisíc sekund i pro nejmenší bubliny o

poloměru v rozmezí $5 \times 10^{-5} \text{ m}$ až $1 \times 10^{-4} \text{ m}$. Dochází tak k účinnému odstranění i těch nejmenších prakticky očekávaných bublin ze skloviny s poloměrem v rozmezí $5 \times 10^{-5} \text{ m}$ až $1 \times 10^{-4} \text{ m}$, což doposud nebylo dosahováno.

Řešení umožňuje využití i více čeřících odstředivek. Např., sklovina tavená
 5 kontinuálně, může být zpracovávána paralelně ve více odstředivkách s časově posunutým režimem potřebnou dobu a teprve potom může postoupit do dalšího kroku. Čeření lze provádět ve velmi širokém rozmezí teplot 1000°C – 1600°C , přičemž pro většinu průmyslových skel je reálná oblast rozmezí 1200°C – 1500°C . Vyšší teploty jsou určeny pro tvrdší typ skel, jako jsou např. borosilikátová skla nebo skla pro LCD obrazovky. Nižší teploty
 10 jsou vhodné pro měkká skla, např. vysoce alkalická skla nebo vysoce olovnatá skla.

Definovaná rozmezí velikosti zařízení, teplot skloviny a průměrné rychlosti bublin byla získána matematickým modelováním a experimentálními zkouškami.

Podobnosti mezi chováním bublin v různých sklech z hlediska jejich separace od taveniny, zjištěné řadou nezávislých měření, je využito pro postup jednoduchého přenosu
 15 optimálních podmínek z modelového skla, na němž byly získány základní poznatky o chování bublin v rotující tavenině, na jiná průmyslová a speciální skla.

Tento přenos se uskuteční pomocí souboru výpočetních dat na modelovém skle, seskupených do několika empirických rovnic, a s použitím teplotní závislosti rychlosti růstu bublin, za podmínek bez aplikace odstředivé síly, která se změří laboratorně na skle, které
 20 má být použito pro proces odstřeďování.

Získaná data zahrnují optimální frekvenci otáček daného rotujícího válce při jeho zadaném plnění taveninou a při zadané teplotě procesu a očekávanou dobu odstranění odhadnuté nejmenší přítomné bubliny, startující ze známé nejnevýhodnější polohy ve válci s taveninou.

25 Původní v tomto souboru znalostí je způsob, jak přenést optimální podmínky na jiný typ skla. Tento přenos se děje na základě:

- a) Zjištění rychlosti růstu bublin ve skle, které má být odstřeďováno, v laboratoři za podmínek bez použití odstředivé síly.
- b) Přenos výsledků laboratorního měření pomocí empirických rovnic udávajících
 30 optimální podmínky pro modelové sklo v definovaném rozmezí vyšetřovaných podmínek, tj. v oblasti rychlosti růstu kritické bubliny, u běžných skel a odpovídajícímu teplotnímu rozmezí čeřících teplot, a pro rotující válcovitá tělesa nárokováných rozměrů a nárokováného plnění.

Rotující těleso vykazující rotační tvar s osovou symetrií, je např. válec či kónus. Válec
 35 je nejvýhodnějším provedením z hlediska výroby i funkce v provozu. Těleso odstředivky válcového tvaru je výhodné z hlediska samotného odstřeďování při rotaci, kdy viskózní kapalina během odstřeďování za vyšších otáček může vytvořit na vnitřní stěně pláště tělesa

odstředivky téměř rovnoměrnou vrstvu, přispívající k rovnoměrnému odstředování a separaci
bublin v této tloušťce skloviny. Těleso odstředivky může rotovat kolem své svislé osy, může
rotovat i v ose kolmé ke svislé ose a může rotovat i při ose nakloněné, přičemž při naplnění
tělesa i jeho výtoku je výhodné využít gravitace a rotující těleso odstředivky natočit v tomto
5 smyslu. Tedy, čeřící odstředivka má osu rotace, která může být nakláněna z vertikální polohy
do horizontální polohy i šikmé polohy, ale preferována je vertikální poloha.

Toto optimální, a dokonce nastavitelné nárokové rozmezí daných hodnot podle
jednotlivých případů, které musí být navzájem sladěné, je výsledkem několikaletého
výzkumu a vývoje.

10 Při nižší nárokové hranici středního poloměru r_0 vnitřního prostoru rotujícího tělesa,
bude čeřící zařízení zabírat menší prostory.

Při vyšším nárokováném středním poloměru r_0 vnitřního prostoru rotujícího tělesa, se
dá předpokládat, že zařízení sice bude robustní a těžké, avšak bude možný při stejném
plnění čeřící odstředivky sklovinou vyšší výkon.

15 Při menší nárokové výšce h_0 rotujícího tělesa, může mít rotující těleso větší střední
poloměr r_0 vnitřního prostoru, a rotující těleso bude mít tvar podobný disku, v tom případě
např. bude vhodné, aby rotující těleso bylo opatřeno dnem i víkem.

Při vyšší nárokové výšce h_0 rotujícího tělesa, může mít rotující těleso nižší střední
poloměr r_0 vnitřního prostoru, a čeřící odstředivka bude mít tvar protáhlého válce či kónusu
20 a v takových případech nebude muset mít čeřící odstředivka víko.

Nárokové rozmezí plnění rotujícího tělesa sklovinou je takové, aby sklovina
nevyplnila celý prostor uvnitř rotujícího tělesa čeřící odstředivky, a aby vzniklý volný prostor
měl tvar rotačního paraboloidu, jehož výška roste s otáčkami a posléze se podobá
cylindrické mezivrstvě konstantní tloušťky. Je kontrolována rychlost rotace, a množství
25 skloviny v odstředivce po naplnění tělesa, tak aby sklovina nevyplnila celý prostor uvnitř
válce odstředivky. Rotace způsobuje radiálně se zvyšující tlakový gradient, jenž nutí bubliny
migrovat radiálně k hladině skloviny.

Při menším podílu naplnění rotujícího tělesa sklovinou, než je nároková spodní
hranice, vykáže odstředivka příliš malý výkon na jedno naplnění. Při vyšším podílu naplnění
30 rotujícího tělesa viskózní sklovinou, nad horní nárokovanou hranici, může dojít k rozpuštění
malých bublin u pláště válcovitého rotujícího tělesa, což by značně prodloužilo dobu jejich
úplného odstranění.

Při nižším počtu otáček rotujícího tělesa, než je nároková spodní hranice, bylo
zjištěno, že nemusí být splněna podmínka účinné a dostatečné separace bublin u dna
35 válcovitého rotujícího tělesa. Při vyšším počtu otáček rotujícího tělesa, nad horní
nárokovanou hranici, dochází opět k rozpuštění malých bublin u pláště válce, což by opět
značně prodloužilo dobu potřebnou pro jejich odstranění. Rovněž by se zvyšovaly nároky na

materiál odstředivky. Rychlost rotace by měla být volena taková, aby byla vytvořena optimální radiální tloušťka skla na povrchu vnitřního pláště rotujícího tělesa čerící odstředivky. V praxi pro kontinuální čerení, nevyčerená sklovina natéká do rotujícího tělesa takovou rychlostí, aby v něm zůstávalo stále stejné množství skloviny a aby sklo vytékalo
5 dole z tělesa převážně u středové osy.

Tento vynález, ve srovnání s tradičním způsobem, odstraňuje bubliny poměrně rychle. Při zachování optimálních podmínek by sklovina neměla obsahovat žádné bubliny větší než 0,1 mm; tedy, sklovina by měla být prosta bublin, protože menší bubliny než průměru 0,1 mm se ve sklovině nepředpokládají. Průměrná dobou zdržení skloviny v odstředivce je okolo 15
10 minut nebo kratší. Doba odstředování závisí zejména na teplotě v tavenině skla - sklovině.

Pro některé případy zařízení, zejména velké výšky h_0 a nízkého středního poloměru r_0 rotujícího tělesa čerící odstředivky, může být rotující těleso na konci přivráceném nátoku skloviny otevřené. Toto otevřené ústí slouží jako nátokový otvor skloviny. To předpokládá menší množství odstředované skloviny, což se týká např. luxusních nebo speciálních typů
15 sklovin. Toto řešení připadá v úvahu při kontinuálním průběhu čerení.

Ve většině výhodných uskutečnění čerící odstředivky, rotující těleso čerící odstředivky na straně přivrácené nátoku skloviny obsahuje víko s nejméně jedním vratně uzavíratelným otvorem pro nátok skloviny a na straně přivrácené výtoku skloviny obsahuje dno s nejméně jedním uzavíratelným otvorem pro výtok skloviny. Čerící odstředivka se dnem a víkem je
20 nejvýhodnější aplikace vynálezu, která zajišťuje bezpečný průběh čerení v uzavřeném prostoru. Otvory ve víku a dně zajišťují nerušený, případně regulovatelný nátok a výtok skloviny a odvod plynů. Otvory pro nátok a/nebo výtok skloviny mohou být situovány v ose rotace tělesa čerící odstředivky, nebo mimo ně.

Čerící odstředivka může být neotápěná v případě výborné tepelné izolace válce nebo
25 při rychlém čerení menšího množství čerené skloviny odstředováním.

Ve většině výhodných uskutečnění čerící odstředivky, a v praktickém využití pro většinu sklovin v teplotním rozmezí 1000 ± 1600 °C, a též podle technických a konstrukčních možností, je čerící odstředivka otápěna plynem nebo elektricky, případně mikrovlnným ohřevem.

Pro většinu konkrétních řešení je výhodné, když rotující těleso, dno, boční stěny a případně víko čerící odstředivky pro odstředování bublin ze skloviny, je zhotoveno ze žáruvzdorné keramiky, nebo žáruvzdorného kovu či slitiny, a je tepelně izolováno, a má vnější kovový plášť. Toto řešení připadá v úvahu pro většinu běžných sklovin, čerených v teplotním rozmezí $1000 - 1600$ °C.
30

Při kontinuálním způsobu čerení musí být zajištěn kontinuální průtok skloviny čerícím
35 zařízením, tj. musí být zajištěna a seřízena rychlost nátoku skloviny, odpovídající rychlosti výtoku skloviny.

Rotující těleso může obsahovat neméně jeden vratně uzavíratelný otvor pro nátok viskózní kapaliny, zejména skloviny, situovaný s výhodou ve vratně uzavíratelném víku. Víko není nezbytně nutné v případě úzkého rotujícího tělesa odstředivky, a potom je pro nátok viskózní tekutiny určena celá tato plocha. U většiny případů se však předpokládá využití
5 vratně uzavíratelného víka, s jedním vtokovým otvorem pro malé množství viskózní kapaliny, nebo více vtokových otvorů u těles většího průměru na nátok, a většího množství odstředované tekutiny.

Rotující těleso také může obsahovat nejméně jeden vratně uzavíratelný otvor pro výtok skloviny, situovaný s výhodou ve dnu rotujícího tělesa. Výtok skloviny, může být situován
10 v rotujícím tělese odstředivky kdekoli, ale toto umístění je nejjednodušší jak pro výrobu, tak pro provoz. Podle velikosti typu rotujícího tělesa odstředivky a množství viskózní kapaliny pro separaci bublin z ní, může být těchto otvorů i více v jednom tělese. U typů rotujících těles s malým průměrem, např. u těles konického typu, dole se zužujících, může sloužit jako otvor pro výtok i celé dno.

15 Rotující těleso nemusí nebo může být ohříváno. Ohřev nemusí být realizován v případě, že se jedná o menší množství odstředované viskózní tekutiny nebo o rychlé vyčerení bublin, kde vzhledem ke krátké době setrvání skloviny v rotujícím tělese též není nutný ohřev čerící odstředivky.

Rotující těleso může být ohříváno, a to v případě odstředování sklovin při vysokých
20 teplotách a větším množství, např. plynem či, elektricky, případně mikrovlnami.

Rotující těleso, určené pro odstředování bublin ze skloviny, je s výhodou zhotoveno ze žárovzdorné keramiky nebo žárovzdorného kovu či slitiny. Tyto odolné žárovzdorné materiály jsou použity proto, že teplota většiny sklovin, při odstředování a separaci bublin ve skle čeráním, se pohybuje v rozmezí 1000-1600°C. Velmi záleží na typu skla, zda se jedná
25 o skla měkčího typu, např. olovnatá a vysoce olovnatá, u nichž se předpokládá nižší teplota pro čerení. Teplota většiny běžných skel při čerání se bude pohybovat cca 1400 °C, u tvrdšího typu skel, např. borosilikátových se předpokládá vyšší teplota.

Způsob čerání skloviny odstředováním, může být určeno pro přetržitý provoz pro menší množství odstředované viskózní kapaliny, zejména skloviny, a to např. sklovin
30 tavených ručně nebo luxusních sklovin. Zde se předpokládá, že k čerání bude stačit jedno rotující těleso odstředivky. Zařízení může pracovat též pro větší množství odstředované skloviny, kde se předpokládá využití více rotujících těles odstředivky, uspořádaných tak, že jejich režimy jsou navzájem časově posunuty, např. při karuselovém uspořádání.

Čerací účinek odstraněných plyných inkluzí může být zvýšen optimalizací otáček,
35 teploty, residenční doby, nebo kombinací těchto podmínek nebo změnou rozměrů čerícího zařízení.

Nevyčerené sklo je přivedeno do rotujícího tělesa čeřící odstředivky, který rotuje okolo středové, v podstatě vertikální, osy. Sklo stéká vlivem gravitační síly dolů po vnitřní stěně rotujícího tělesa. Rychlost rotace, teplota a rychlost vtoku jsou takové, že sklovina vytváří radiální vrstvu na vnitřní stěně rotujícího tělesa a umožňují vyčerené sklovině po ukončení
5 rotace opustit toto těleso vhodným výtakovým otvorem, s výhodou v radiálním směru.

Přehled obrázků na výkresech

10 Vynález je podrobně popsán dále na příkladných provedeních, a objasněn pomocí schematických výkresů, z nichž rotující těleso odstředivky představuje:

obr. 1 axonometrický pohled na rotující těleso čeřící odstředivky, bez skloviny, kde těleso je
nahoře otevřené, dole má uzavřené dno,

15 **obr. 1a** axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při naplnění sklovinou,

obr. 1b axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při odstředování, a

obr. 1c axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při výtoku skloviny.

obr. 2 axonometrický pohled na rotující těleso čeřící odstředivky, bez skloviny, kde těleso je
20 *otevřené nahoře, a s otvorem ve dnu,*

obr. 2a axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při naplnění sklovinou,

obr. 2b axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při odstředování, a

obr. 2c axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při výtoku skloviny;

25 **obr. 3** axonometrický pohled na rotující těleso čeřící odstředivky, bez skloviny, kde těleso má
víko s otvorem, dole má uzavřené dno,

obr. 3a axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při naplnění sklovinou,

obr. 3b axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při odstředování, a

obr. 3c axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při výtoku skloviny;

30

obr. 4 axonometrický pohled na rotující těleso čeřící odstředivky, bez skloviny, kde těleso má
otvor ve víku i dně,

obr. 4a axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při naplnění sklovinou,

obr. 4b axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při odstředování, a

35 **obr. 4c** axonometrický pohled na toto rotující těleso čeřící odstředivky při výtoku skloviny.

Na dalších obrázcích jsou znázorněny různé závislosti související s odstraňováním bublin ze skloviny při čerání odstřediváním.

Obr. 5 znázorňuje závislost doby potřebné k odstranění nejmenší bubliny ze skloviny na rychlosti rotace.

Obr. 6 znázorňuje závislost doby vyčerení na rychlosti růstu bublin ze skloviny za podmínek bez uplatnění odstředivé síly.

Obr. 7 znázorňuje závislost optimální doby odstranění bubliny o poloměru 5×10^{-5} a 1×10^{-4} m na průměrné tloušťce vrstvy skloviny při 1400°C .

Obr. 8 znázorňuje závislost optimální doby odstranění bubliny o poloměru 5×10^{-5} a 1×10^{-4} m na průměrné tloušťce vrstvy skloviny při 1450°C .

Obr. 9 znázorňuje závislost optimální doby odstranění bubliny o poloměru 5×10^{-5} a 1×10^{-4} m na průměrné tloušťce vrstvy skloviny při 1500°C .

Obr. 10 znázorňuje závislost optimální úhlové rychlosti rotace rotujícího tělesa na průměrné tloušťce vrstvy skloviny pro bublinu o poloměru 5×10^{-5} m při polovičním plnění rotujícího tělesa sklovinou.

Obr. 11 znázorňuje závislost součinu úhlové rychlosti rotace rotujícího tělesa a optimální doby odstranění bubliny o poloměru 5×10^{-5} m na stupni plnění rotujícího tělesa sklovinou.

Obr. 12 znázorňuje průměrné rychlosti růstu bublin ve sklovině bez účinku odstředivé síly a v optimálním případě skloviny rotující ve válci poloměru 0,25 m a s polovičním plněním sklovinou, jako funkce teploty.

Příklady provedení vynálezu

Příklad 1

5 Čeřící odstředivka

Zařízení k čeření skloviny 7 odstředováním může být určeno pro přetržitý provoz. Jeho podstatná část, čeřící odstředivka může být otápěna plynem nebo elektricky, případně mikrovlnným ohřevem (neznázorněno). Rotující těleso 1, dno 3, plášť 4 a případně víko 2 čeřící odstředivky pro odstředování bublin ze skloviny 7, je obvykle zhotoveno ze žáruvzdorné keramiky nebo žáruvzdorného kovu či slitiny, s vnějším ocelovým pláštěm a
10 ze žáruvzdorné keramiky nebo žáruvzdorného kovu či slitiny, s vnějším ocelovým pláštěm a případně je pod ocelovým pláštěm tepelná izolace. Zařízení k čeření skloviny 7 odstředováním může zahrnovat různé typy tělesa 1 čeřící odstředivky, z nichž některá jsou uvedena dále.

Na obr. 1 je axonometricky znázorněno rotující těleso 1 čeřící odstředivky pro zařízení
15 k čeření skloviny 7 odstředováním. V rotujícím tělese 1 se účinkem odstředivé síly provádí separace bublin ze skloviny 7, aniž by přitom docházelo k rozpuštění bublin ve sklovině 7. Rotující těleso 1 má válcovitý plášť 4, horní plochu na straně přivrácené nátoku skloviny 7, a protilehlou dolní plochu tvořenou dnem 3. Rotující těleso 1 čeřící odstředivky má rotační tvar s osovou symetrií shodnou s jeho osou 8.

Na obr. 1 je znázorněno prázdné rotující těleso 1 čeřící odstředivky, bez skloviny 7,
20 které je *nahoře otevřené, a dole je uzavřeno dnem 3 bez otvoru pro výtok skloviny 7*. Těleso 1 má tedy horní plochu na straně přivrácené nátoku skloviny 7 zcela otevřenou, a tato otevřená horní plocha slouží jako nátokový otvor 5 skloviny 7 do celkového vnitřního prostoru V_0 rotujícího tělesa 1.

Na obr. 1a je znázorněno rotující těleso 1 těsně po naplnění sklovinou 7. Na tomto
25 obr. 1a je naznačen šipkou směr 9 nátoku skloviny 7 do tohoto typu rotujícího tělesa 1 čeřící odstředivky, konečné množství skloviny 7 při naplnění rotujícího tělesa 1 o obsahu V , a konečná hladina skloviny 7 v tělese 1 určené k čeření.

Na obr. 1b je šipkou naznačen směr 11 rotace tohoto tělesa 1 čeřící odstředivky při
30 odstředování skloviny 7, a též vytvoření parabolického útvaru skloviny 7 na vnitřní stěně pláště 4 a dnu 3 tělesa 1 během odstředování.

Na obr. 1c je naznačen směr 10 výtoku skloviny 7 z tohoto typu tělesa 1 po ukončení
odstředování a při pohledu na vylévání skloviny 7 horní otevřenou plochou tělesa 1 čeřící odstředivky.

Na obr. 2 je znázorněn jiný typ tělesa 1 čeřící odstředivky, kde těleso 1 je opět jako
35 v předchozím příkladu provedení *otevřené nahoře*, takže otevřená horní plocha slouží jako

nátokový otvor 5 skloviny 7 do vnitřního prostoru V_0 tělesa 1. Avšak v tomto případě těleso 1 čeřící odstředivky má dno 3 opatřeno výtokovým otvorem 6.

Na obr. 3 je znázorněn další typ tělesa 1 čeřící odstředivky, bez skloviny 7, kde těleso 1 má uzavřené dno 3, bez otvoru pro výtok. Těleso 1 je však na své horní ploše opatřeno víkem 2 s nátokovým otvorem 5 pro nátok skloviny 7.

Na obr. 4 je vyobrazen další typ tělesa 1 čeřící odstředivky, bez skloviny 7, jehož dno 3 je opatřeno centrálním výtokovým otvorem 6 pro výtok skloviny 7, a víko 2 je opatřeno nátokovým otvorem 5 pro nátok skloviny 7.

Obdobně jako na obr. 1a je na obr. 2a, 3a, 4a znázorněn příslušný popsany typ tělesa 1 čeřící odstředivky, a to vždy v okamžiku naplnění sklovinou 7, která zaujímá obsah V . Na těchto obrázcích 1a, 2a, 3a, 4a je naznačen šipkou směr 9 nátok skloviny 7 do tohoto typu tělesa 1 čeřící odstředivky příslušným nátokovým otvorem 5. Nátokový otvor 5 představuje buď celá otevřená horní plocha příslušného typu tělesa 1 jak je znázorněno na obr. 1a, 2a, nebo nátokový otvor 5 je vytvořen jako centrální otvor v horním vratně uzavíratelném víku 2 tělesa, jak je znázorněno na obr. 3a, 4a. Na těchto obrázcích 1a, 2a, 3a, a 4a je patrná též hladina skloviny 7 v tělese 1, určená k čeření skloviny 7.

Obdobně jako na obr. 1b, je na obr. 2b, 3b, 4b znázorněn příslušný popsany typ tělesa 1 čeřící odstředivky, a to v okamžiku rotace tělesa 1 se sklovinou 7. Směr 11 rotace tělesa 1 je označen šipkou. Všechny typy těles 1 s otáčejí kolem svislé centrální osy 8 tělesa 1. Z obrázků je též patrné, že sklovina 7 při rotaci tělesa 1 vytváří paraboloid.

Obdobně jako na obr. 1c je též na obr. 2c, 3c, 4c znázorněn příslušný popsany typ tělesa 1 čeřící odstředivky, a to vždy v okamžiku vylévání skloviny 7 z výtokového otvoru 6 tělesa 1. Směr 10 výtok skloviny 7 z tělesa 1 je naznačen na obr. 1c, 2c, 3c, 4c šipkou.

Sklovina 7 vytéká z tělesa 1, které má plné dno 3 při naklonění tělesa 1, buď z otevřené horní plochy tělesa 1 nebo z nátokového otvoru 5 ve víku 2, které se při tomto úkonu stávají i výtokovými otvory 6, jak je znázorněno na obr. 1c, 3c.

V případě, kdy je dno 3 opatřeno ve dně 3 centrálním výtokovým otvorem 6 pro výtok, sklovina 7 vytéká z tohoto výtokového otvoru 6 ve dnu 3 vlastní vahou, bez naklání tělesa 1, jak je znázorněno na obr. 2c, 4c.

Nejčastější a nejvýhodnější volba typu tělesa je znázorněna na obr. 4, 4a, 4b, 4c s nátokovým otvorem 5 ve víku 2 tělesa 1 a výtokovým otvorem 6 ve dnu 3 tělesa 1, z hlediska výroby tělesa 1 i jeho funkce.

Užitečné je konstatování, že nejvýhodnější uskutečnění pro výrobu i funkci těchto uvedených typů těles 1 je takové, že výtokový otvor 6 a/nebo nátokový otvor 5 je situován přímo v ose 8 tělesa 1, kdy osa 8 je současně i osou rotace tělesa 1.

I když to není znázorněno, horní plocha tělesa 1 na straně přivrácené nátoku 5 skloviny 7, která je opatřena víkem 2 může být opatřena větším počtem uzavíratelných nátokových otvorů 5 skloviny 7, v případě širšího typu tělesa 1 nebo tělesa 1 větších rozměrů.

V obdobných případech, i když to není znázorněno, též dno 3 může být opatřeno větším počtem výtokových otvorů 6. Je zřejmé, že v těchto příkladech výtokové otvory 6 a/nebo nátokové otvory 5 jsou situovány mimo osu 8 tělesa 1.

Na obr. 1, 2, 3, 4 je znázorněn celkový vnitřní prostor V_0 různých typů válcovitého tělesa 1, a pro tomto celkovému vnitřnímu prostor V_0 odpovídá celková výška h_0 a odpovídající střední poloměr r_0 .

Na obr. 1a, 2a, 3a, 4a je znázorněn obsah V skloviny 7 určený k čerění, při naplnění tělesa 1.

Pro všechny uvedené typy těles 1 čerící odstředivky platí, že celkový vnitřní prostor V_0 tělesa 1 vykazuje střední poloměr r_0 v rozmezí 0,05 – 1 m; a celkovou výšku h_0 v rozmezí 0,1 – 1,5 m.

Přitom podíl obsahu V vnitřního prostoru rotujícího tělesa 1 naplněného sklovinou 7, určenou k čerění ku celkovému vnitřnímu obsahu V_0 rotujícího tělesa 1 je v poměru $V_7/V_0 = 0,20 \text{ -- } 0,80$.

Důležitým parametrem pro čerění skloviny 7 odstředováním je rychlost rotujícího tělesa 1 čerící odstředivky při odstředování, která je v rozmezí 10 – 200 rad.s^{-1} .

20

Způsob čerění skloviny 7 odstředováním je popsán dále.

Pro vícesložkové bubliny - a jen takové se vyskytují při výrobě skla - se uplatní dva mechanismy odstranění bublin ze skloviny 7, ale pouze jeden je přípustný pro splnění požadavku rychlého čerění: odstředění. Byla nalezena oblast přípustných podmínek pro rychlý proces odstředění, která je kromě parametrů samotného procesu závislá i na typu skla, respektive na transportu plynů mezi bublinami a sklovinou 7.

Výskyt především velmi malých bublin ve sklovině 7 po odstředění velmi omezoval použitelnost způsobu čerění skel pro náročné sklářské výroby. Nabízela se spíše možnost použít odstředění tam, kde jsou požadavky na kvalitu skla nižší (norma pro některá skla připouští velmi malé bubliny), nebo použít odstředování pouze jako první stupeň procesu odstraňování bublin. Obě možnosti jsou však ústupkem od možnosti používat odstředivou sílu jako plnohodnotný nástroj k získání skla zcela bez bublin. Požadavkem úspěšného používání odstředování je získat za dobu znatelně kratší než při klasickém čerění v gravitačním poli sklovinu 7 zcela bez bublin, tedy i bez velmi malých bublin – kyšpy. Pro tento účel však chyběla detailní znalost chování bublin. Při aplikaci odstředivé síly pro

odstraňování bublin nastanou totiž poměry odlišné od chování kapiček nebo pevných částic, které jsou odstřeďováním běžně separovány. V důsledku stlačitelnosti plynů se bubliny v okamžiku zahájení rotace smrští a účinek odstředivé síly se zmenší, neboť je závislý na druhé mocnině okamžitého rozměru bublin. Zvýšení tlaku v bublinách má rovněž za
5 následek zvýšení koncentrace jednotlivých plynů přítomných v bublinách na povrchu bublin podle Henryho zákona, a tím se podporuje rozpouštění plynů z bubliny do skloviny 7. Další pokles rozměru bubliny tak dál snižuje její rozměr a malé bubliny se mohou při vysokých otáčkách zcela rozpustit. Pokud k úplnému rozpouštění nedojde, bubliny po ukončení rotace opět narostou úměrně k původnímu zvýšení tlaku, což se jeví jako vada. Tento jev byl
10 pravděpodobnou příčinou výskytu většího množství malých bublin po odstředění, jak uváděla výše zmíněná patentová řešení. Pro odstřeďování bublin se tedy jeví jejich stlačitelnost a následná očekávaná interakce se sklovinou 7 jako zásadní pro účinnost procesu. Rovněž možný mechanismus úplného rozpouštění bublin vyžaduje svoje vyhodnocení.

Z řečeného je zřejmé, že úspěšné technické řešení není ani tak primárně založeno na
15 technickém uspořádání samotného čeracího zařízení, např. zda jde o přetržitý nebo nepřetržitý provoz, jako na přesné a obecné znalosti chování bublin v odstředivém poli. Nedávná studie navrhovatelů tohoto patentu využila matematického modelu chování vicesložkových bublin v modelovém skle pro výrobu televizních obrazovek k parametrické studii chování bublin v odstředivém poli tak, aby bylo vysvětleno předpokládané složité
20 chování bublin za těchto podmínek a nalezeny jeho obecné rysy. Použití modelového televizního skla bylo motivováno především faktem, že u tohoto ve své době široce vyráběného skla bylo známo velké množství dat, především dat týkajících se koncentrací, rozpustností a difúzních koeficientů plynů, která jsou pro oživení modelu chování bublin potřebná.

25 Ucelený systém dat získaný systematickým matematickým modelováním chování bublin kritické velikosti na modelovém skle je zpracovaný s cílem přenosu na jiný typ skla a uvedený ve formě jednoduchých semi-empirických a empirických rovnic. Princip přenosu dat na jiná skla spočívá ve využití prokázané podobnosti chování bublin v různých typech skel, jestliže platí, že veličina rychlosti růstu bublin v sklovině 7 za podmínky bez aplikace
30 odstředivé síly (měřitelná laboratorně) je stejná pro modelové a k aplikaci uvažované sklo. Na základě změřené průměrné rychlosti růstu bublin nebo teplotní závislosti průměrné rychlosti růstu bublin za předpokládaných podmínek (teplot, případně tlaku) ve skle určeném pro aplikaci a na základě požadavku na efektivní čerací výkon zařízení nebo na základě konstrukčního požadavku na rotující těleso 1 a ze systému modelových dat se získá hodnota
35 optimální úhlové rychlosti rotace válce a příslušná optimální doba potřebná k odstranění všech bublin včetně malých bublin udané kritické velikosti.

Pro matematický model bylo zvoleno rotující těleso 1 ve tvaru válce, znázorněného na obr. 1, 2, 3, 4. Výsledky sledování chování bublin ve sklovině 7 ve válci ukázaly, že je třeba využívat částečného plnění válce sklovinou 7 skla, takže odstraňování bublin ze skloviny 7 odstředivou silou – dostředování – probíhá ve vrstvě skloviny 7 u pláště rotujícího válce a že podmínky odstředování musí být dosti přesně nastaveny. Důvodem pro přesné nastavení byl fakt, že při rotaci byly bubliny odstraňovány skutečně dvěma mechanismy: úplným rozpouštěním malých bublin ve sklovině 7 a dostředováním větších bublin v důsledku jejich pohybu směrem k zakřivené hladině. Proces rozpouštění se však ukázal pro technické využití jako nevhodný, neboť časy rozpouštění malých bublin byly příliš vysoké oproti časům potřebným běžně pro separaci odstředěním. K rozpouštění velmi malých bublin docházelo za vyšších otáček u pláště válce a při dalším zvyšování otáček se začaly rozpouštět stále větší bubliny, které ovšem potřebovaly ke svému rozpouštění stále delší časy. Při velmi nízkých otáčkách naopak byl účinek odstředivé síly malý a separace bublin dostředěním byla rovněž pomalá.

Z uvedeného chování bylo zřejmé, že rozpouštění malých bublin je třeba vyloučit a současně je třeba zajistit dostatečný účinek odstředivé síly, aby separace bublin byla rychlá. Obrázek 5 ukazuje na příkladu že za daných podmínek, tj. složení skla, teploty, tlaku a počáteční velikosti bubliny, je doba potřebná k odstranění bubliny z rotující vrstvy skloviny 7 poměrně složitou funkcí účinku odstředivé síly, která je v daném případě u válce o poloměru 0,5 m do poloviny naplněného taveninou televizního skla reprezentovaná úhlovou rychlostí rotace válce. Minimální čas při poměrně nízkých otáčkách, vyjádřený zde úhlovou rychlostí rotace v rad.s^{-1} , ukazuje podmínky pro nejrychlejší odstranění bubliny separací, odstředěním k hladině skloviny 7, zatímco maximum znázorňuje již rozpouštění této bubliny. Při ještě vyšších otáčkách se pak bublina již jen rozpouští a narůstá tlak na plášť 4 rotujícího tělesa 1. Je-li přítomen celý soubor bublin různých velikostí, nastává rozpouštění vždy nejprve u nejmenších bublin, a proto je třeba hledání optimálních podmínek, daných zmíněným optimem, spojit s existencí nejmenších přítomných bublin nebo maximálních bublin, které ještě dovoluje za rozměr takových nejmenších bublin přijmout poloměr $5 \times 10^{-5} \text{ m}$ nebo $1 \times 10^{-4} \text{ m}$ při nižší normě kvality skla. Vycházejíce z laboratorních zkušeností a zkoumání vad typu bublin, se bubliny v roztavených sklech v daném tavicím stádiu obvykle nevyskytují, vzhledem k jejich předchozímu pobytu ve skle za vyšších teplot, kdy bubliny velmi pomalu rostou. Jestliže se při hledání optimálních podmínek zaměříme na tyto nejmenší bubliny, najdeme pro daný případ podmínky nejpřísnější.

Na křivce v obr. 5 je znázorněn v nejvyšším bodě nejhorší možný stav odstranění bubliny a změna mechanismu při odstředování, tj. změna z odstředování na rozpouštění bubliny. Křivka vlevo od nejvyššího bodu představuje stav, kdy bubliny jsou ve sklovině 7 odstředovány.

Na křivce vlevo na obr. 5 je též ukázán **ideální stav v nejnižším bodu křivky, odpovídající nejkratší době odstranění bubliny odstředěním**. Křivka vpravo od změny mechanismu, od nejvyššího bodu této křivky představuje stav, kdy se bublina ve sklovině 7 rozpustí.

5 Předchozí uvedená fakta svědčí o tom, že nastavení vhodných podmínek pro odstředování je omezeno na poměrně úzkou oblast velikostí účinku odstředivé síly. Jak již bylo předpokládáno, účinek odstředivého tlaku způsoboval nejen smrštění bublin, což je z hlediska odstředování nepříznivé, ale vyvolal i difúzi plynů z bublin do taveniny – skloviny 7 čímž se dále zmenšoval jejich rozměr a účinek odstředivé síly. Druhý účinek byl pak závislý
10 na počtu přítomných plynů v bublině a rychlosti, kterou byly plyny schopny difundovat sklovinou 7. Zdálo by se tedy, že použití odstředivé síly za takové situace je spojeno s příliš vysokými požadavky na proces jejího nastavení, na druhé straně však výsledky modelovací studie prokázaly, že za příznivých podmínek je rychlost procesu separace bublin, vyjádřená čeficemi časy nejmenších bublin, podstatně vyšší než při odstraňování bublin vyplutím
15 k hladině pouze gravitací. Pro praktické využití odstředivé síly k odstraňování bublin z roztavených skel je tedy třeba získat zobecnění stručně zmíněných výsledků modelování bublin tak, aby pomocí zobecněných výsledků bylo možno nalézt u jakékoliv skloviny 7 oblast optimálních podmínek odstředění.

Pro praktické použití je třeba pro daný typ skla správně volit případné čefici přísady
20 a dále podmínky odstředování: poloměr r_0 a výšku h_0 rotujícího celkového válcového vnitřního prostoru V_0 tělesa 1, stupeň jeho naplnění sklovinou 7 a rychlost rotace tohoto vnitřního prostoru V_0 . Je třeba rovněž odhadu kritických nejvyšších čeficích dob nejmenších bublin.

Tento předložený vynález se týká přetržitého způsobu čerení, který má význam
25 zejména pro skla připravovaná v menších množstvích nebo pro použití v nepřetržitém provozu, kde je odebírání vyčerené skloviny 7 možno dosáhnout použitím více rotujících válců těles 1, případně se zásobníkem vyčerené skloviny 7.

Nastavení vhodných podmínek odstředování by u každého skla vyžadovalo matematického modelování chování bublin v předpokládaném rotujícím prostoru a nalezení
30 optimálních podmínek opakovanými výpočty. Potřeba velkého množství dat, zejména dat plynů vyskytujících se rozpuštěných ve sklech nebo v bublinách, však tuto možnost téměř znemožňuje, neboť potřebná data se získávají speciálními měřicími metodami a jejich získání vyžaduje dlouhodobá měření. Zkušenosti ze stávajících patentovaných a známých řešení pak ukazují, že odhad parametrů bez bližší znalosti chování bublin nevede ke
35 kvalitnímu procesu odstranění bublin ze skloviny 7. Zkušenosti původců tohoto vynálezu však ukazují, že bubliny se ve sklech chovají velmi podobně během jejich odstraňování ze

skloviny $\underline{Z}$, vyplouváním k hladině vlivem vztaku. Mnoho provedených měření prokázalo, že i při použití různých čeracích přísad na různých typech skel a za rozdílných příhodných teplotních nebo tlakových podmínek, mají bubliny velmi podobné doby čerení potřebné k vystoupení k hladině, pokud vykazují stejnou rychlost růstu svých rozměrů. Za podmínek

5' racionálního provozování čeracího procesu, je tedy rychlost růstu bublin, která určuje okamžitý rozměr malých kritických bublin, rozhodující pro dobu jejich vyčerení a ostatní vlastnosti skloviny $\underline{Z}$ významné pro vzestup bublin, jako je její hustota a viskozita, hrají jen podřadnou roli. Znamená to rovněž, že rychlost stoupání bubliny v různých sklovinách $\underline{Z}$ nebo za různých teplotních podmínek se příliš neliší, jestliže jsou shodné rychlosti růstu

10' bublin, což bylo zjištěno experimentálně. Tento fakt dosvědčuje závislost doby čerení velmi malých bublin o počátečním poloměru $a_0 = 5 \times 10^{-5}$ m na rychlosti jejich růstu v obrázku 6, získaná na různých typech skel za různých teplotních i tlakových podmínek. V široké oblasti rychlosti růstu bublin je doba čerení funkcí rychlosti jejich růstu a údaj o rychlosti růstu bublin je tudíž jediným potřebným a značně spolehlivým údajem o tzv. čeritelnosti skel. Zkušenosti

15 z praxe ukázaly, že špatně čeritelná skla vykazují hodnoty rychlosti růstu bublin menší než 10^{-7} m.s⁻¹, středně čeritelná skla hodnoty mezi 10^{-6} a 10^{-7} m.s⁻¹ a velmi dobře čeritelná skla hodnoty menší než nad 10^{-6} m.s⁻¹. Hodnota rychlosti růstu bublin je snadno měřitelná v laboratoři vysokoteplotním sledováním závislosti poloměru bublin na čase a odečtením směrnice téměř lineární závislosti mezi poloměrem bublin a časem. Z měření většího

20 množství bublin je pak získána průměrná rychlost růstu bublin. Tento fakt podobnosti skel při čerení vyplouváním k hladině v gravitačním poli může být využit i při hledání optimálních podmínek jejich odstřeďováním.

Protože i v odstředivém poli se bubliny odstraňují mechanismem založeným na rozdílu hustot bubliny a skloviny $\underline{Z}$ (rovnice pro radiální rychlost bubliny má formálně stejný

25 tvar jako Stokesova rovnice pro vzestup bublin v gravitačním poli), lze velmi dobře předpokládat, že bubliny se stejnou rychlostí růstu bublin se budou velmi podobně chovat i v odstředivém poli. Tento předpoklad vychází z výsledků matematického modelování v odstředivém poli, které ukázaly, že velmi důležitým parametrem odstraňování bublin je především jejich schopnost rozpouštět se nebo růst, která je obecně určována přesycením

30 nebo nasycením skloviny $\underline{Z}$ za daných podmínek bez uplatnění odstředivé síly. Tato schopnost je dobře reprezentována zmíněnou *rychlostí růstu bublin*, která je laboratorně měřitelná. Jako další významný a obecný faktor čeracího procesu uplatňující se již v rotujícím válcovém prostoru se pak ukazuje *odstředivý tlak* vznikající rotací, který působí proti přesycení nebo stupni nasycení skloviny $\underline{Z}$ plyny způsobenému především aplikací čeracího

35 činidla za příslušné teploty. Tento odstředivý tlak může za určitých podmínek vyvolat i částečné rozpouštění bublin nebo jejich úplné rozpuštění. Pro radiální pohyb bublin ke středu válce působí *dostředivé zrychlení*. Posledním důležitým faktorem čeracího procesu

v odstředivém poli se pak ukazuje čas, který stráví bublina v sklovině 7 do dosažení zakřivené hladiny. Tento čas může být reprezentován *tloušťkou vrstvy skloviny 7*, kterou musí projít kritická bublina, startující od pláště válce. Role jednotlivých faktorů je tedy následující:

- 5' *Rychlost růstu bublin* změřená za daných teplotních a tlakových podmínek na daném typu skla bez účinku odstředivé síly představuje obecnou schopnost bublin růst nebo se rozpouštět atmosférického tlaku i za změněných tlakových podmínek způsobených rotací.

Odstředivý tlak vyvolaný rotací představuje faktor omezující účinek přesycení nebo nasycení plyny, jehož hodnota závisí na parametrech odstředování, tj. rychlosti rotace, 10 poloměru válcového prostoru a tloušťce vrstvy skloviny 7 při odstředování, při němž sklovina 7 ulpívá zejména na plášti 4 rotujícího tělesa 1. Odstředivý tlak poskytuje současně informaci o potřebné pevnosti rotujícího prostoru, který musí snadno snášet tlakové zatížení.

Dostředivé zrychlení spoluurčuje rychlost, jakou se bude bublina pohybovat směrem ke středu válcovitého rotujícího tělesa 1.

- 15 *Tloušťka vrstvy skloviny 7* u pláště 4 válcovitého rotujícího tělesa 1, určuje čas odstranění bubliny.

Tento vynález je založen na předpokladu podobného chování bublin v odstředivém poli, jestliže podmínky odstředování vyústí ve stejné hodnoty rychlosti růstu bublin a vztahují se ke stejné tloušťce vrstvy odstředované skloviny 7. Jestliže můžeme na modelovém skle 20 definovat podmínky nejkratšího času odstranění kritických bublin, tj. nejmenších bublin startujících z nejnevýhodnějšího místa na dně 3 válce a u jeho pláště, dostředěním směrem ke středu rotujícího válce, které odpovídají minimu pro praktické využití. Tyto podmínky jsou přenositelné i na jiné sklo a jiné uspořádání odstředovacího procesu. Podobné chování bublin potom znamená, že pro kritické bubliny stejné rychlosti růstu a stejnou průměrnou 25 tloušťku vrstvy skla budou doby odstranění kritické bubliny v jiném skle přibližně stejné a rovněž optimální frekvence rotace válce bude mít stejnou hodnotu.

Aby bylo možno takový přenos provést, bylo nutno rozšířit počet modelovaných případů tak, aby byla pokryta široká oblast prakticky dosahovaných rychlostí růstu bublin a tlouštěk vrstev skloviny 7 v rotujících válcích. Různých tlouštěk vrstev skloviny 7 při 30 odstředování je možno dosáhnout buď ve válcích většího poloměru s menším či průměrným plněním nebo ve válcích menšího průměru a vyšším plněním sklovinou 7. Byly vzaty v úvahu na modelovém skle teploty v rozmezí 1350 – 1550°C, což odpovídá širokému rozmezí rychlostí růstu bublin v modelovém skle za normálního tlaku $1,13 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ – $4,62 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$, poloměry rotujících těles 1 čerčících odstředivek od 0,1 do 0,75 m a stupeň plnění rotujícího 35 tělesa 1 ve tvaru válce sklovinou 7 daný poměrem mezi objemem V skloviny 7 a celkovým vnitřním objemem rotujícího tělesa $1 V/V_0$ od 0,25 do 0,75. Při každé teplotě byly odečteny průměrné rychlosti růstu bublin za normálního tlaku z oblasti přibližně lineární závislosti

poloměru bubliny na čase, které reprezentují rychlost růstu bublin z Tabulky 1 a jsou u jiných skel než skla modelového dostupné laboratorním měřením. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 1, spolu s průměrnou rychlostí růstu kritické bubliny v optimálním případě získanou modelováním odstředování ve válci poloměru 0,25 m naplněného do poloviny taveninou modelového TV skla (televizního skla). Pro přenos výsledků je totiž důležité, aby rychlosti růstu bublin v případě bez odstředování a s odstředováním byly podobné. To následující Tabulka 1 dokazuje.

Tabulka 1

teplota [°C]	1350	1400	1450	1500	1550
rychlost růstu [m.s ⁻¹]					
$\omega = \omega_{\text{opt}}$ [rad.s ⁻¹] kritické bubliny při odstředování	$2,19 \cdot 10^{-8}$	$3,39 \cdot 10^{-7}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$2,71 \cdot 10^{-6}$	$4,62 \cdot 10^{-6}$
$\omega = 0$ [rad.s ⁻¹] kritické bubliny bez odstředování	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$4,34 \cdot 10^{-7}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$2,08 \cdot 10^{-6}$	$3,21 \cdot 10^{-6}$

Tabulka 1 ukazuje průměrné hodnoty rychlosti růstu bublin kritické velikosti $5 \cdot 10^{-5}$ m, pohybujících se ve válci poloměru 0,25 m, s plněním 0,5 za optimálních podmínek a při různých teplotách. V tabulce 1 je ukázána průměrná hodnota rychlosti růstu bublin v modelovém TV skle při odstředování skla a bez odstředování TV skla při $\omega = 0 \text{ rad.s}^{-1}$.

Tyto výsledky jsou rovněž uvedeny na obrázku 12, kde jsou uvedeny dvě závislosti. Jedna křivka ukazuje průměrné hodnoty rychlosti růstu kritické bubliny v modelovém TV skle počátečního poloměru $5 \cdot 10^{-5}$ m pohybujících se ve válci poloměru 0,25 m s plněním 0,5 za rotace při optimálních podmínkách a při různých teplotách. Druhá křivka ukazuje průměrné rychlosti růstu kritické bubliny v modelovém TV skle bez rotace, při $\omega = 0 \text{ rad.s}^{-1}$, za různých teplot.

Pro teplotní závislost průměrné rychlosti růstu bublin modelové skloviny, dále pro jednodušší vyjádření taveniny (TV skloviny), viz Tabulka 1, je vytvořena empirická rovnice např. polynomického nebo exponenciálního typ (obr. 12):

$$da/d\tau = A \exp\left(\frac{b}{\tau+c}\right) \quad (1)$$

kde : a je poloměr [m] bubliny, b je konstanta [s], c je konstanta [s], τ je čas [s], A je konstanta [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Konstanty se získají z experimentálních hodnot.

Podrobnými modelováním jednotlivých případů byly získány závislosti mezi dobami vyřešení kritických bublin o velikosti počátečního poloměru $a_0 = 5 \times 10^{-5}$ nebo 1×10^{-4} m a úhlovou rychlostí rotace válcového čerčícího prostoru. Z těchto závislostí bylo odečteno minimum čerčícího času kritických bublin při optimální úhlové rychlosti rotace pro praktické použití (viz minimum v obrázku 5). Závislost nejkratší – optimální – doby τ_{opt} je za dané teploty (rychlosti růstu bublin) přímo úměrná tloušťce vrstvy skloviny $\bar{z}$ ve válci v širokém rozmezí poloměrů válce a jeho plnění. To demonstrují obrázky 7 a 9, pro teploty 1400, 1450 a 1500 °C, a pro kritické bubliny poloměru 5×10^{-5} a 1×10^{-4} m; kdy plnění válce sklovinou $\bar{z}$ se pohybuje mezi 0,25 a 0,75.

Pro jednodušší vyjádření, vzhledem k následujícím rovnicím a výpočtům, je dále užíván pro sklovinu $\bar{z}$ termín *tavenina*, a pro válcovité rotující těleso 1 je dále užíván termín *válec*, všude kde je to vhodné.

Na obr. 7 a 9 je znázorněna závislost optimální doby odstranění bubliny (času potřebného pro odstranění bubliny při optimální úhlové rychlosti rotace) na průměrné tloušťce vrstvy skelné taveniny ve válci odstředivky při teplotách 1400, 1450 a 1500 °C. Poloměry kritických bublin jsou 5×10^{-5} a 1×10^{-4} m.

Z obrázků 7 a 9 je tedy za dané teploty, možno odečíst dobu odstranění kritické bubliny za dané teploty a při dané tloušťce vrstvy taveniny ve válci. Protože u dané taveniny, zjistíme laboratorně rychlost růstu bublin odpovídající libovolné teplotě v rozmezí teplot vyšetřovaném modelováním, je třeba z modelovacích pokusů získat empirickou rovnici vyjadřující závislost konstant přímkových závislostí na obrázcích 7 a 9 na teplotě modelového skla.

Přímková závislost τ_{opt} na průměrné tloušťce vrstvy má pak tvar:

$$\tau_{opt} = k(t)\bar{\delta} + q(t) \quad (2)$$

kde : τ_{opt} je optimální doba [s] odstranění bubliny, $k(t)$ je konstanta [$\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$] závislá na teplotě, $\bar{\delta}$ je průměrná tloušťka [m] vrstvy skla na plášti válce, $q(t)$ je konstanta [s] závislá na teplotě.

Další potřebnou přenosnou hodnotou je hodnota optimální úhlové rychlosti ω_{opt} , určující rychlost rotace válce v aplikovaném případě. Příkladem modelované závislosti optimální úhlové rychlosti ω_{opt} na průměrné tloušťce vrstvy taveniny při různých teplotách je modelování pro kritickou bublinu o poloměru 5×10^{-5} m, při poměru plnění válce $V/V_0 = 0,5$ je

znázorněno na obrázku 10. Je zřejmé, že při vyšších tloušťkách vrstvy taveniny ve válci závisí hodnota ω_{opt} na teplotě jen velmi málo.

Pro přesné získání příslušné hodnoty ω_{opt} poslouží hodnoty součinů $\omega_{opt}\tau_{opt}$, které představují počet radiánů (a tedy i počet otáček), které musí válec vykonat, aby bublina dosáhla hladiny. Modelování ukázalo, že hodnoty tohoto součinu pro bublinu dané velikosti, plnění válce a teploty jsou zhruba nezávislé na poloměru válce a daný stav může být charakterizován průměrnou hodnotou tohoto součinu. Hodnoty průměrného součinu $\omega_{opt}\tau_{opt}$ pro kritickou bublinu poloměru 5×10^{-5} m jsou pak vyneseny jako funkce plnění válce V/V_0 na obrázku 11. Modelované závislosti jsou v rozmezí zkoumaných plnění válce přímkové.

Pro získání příslušné hodnoty ω_{opt} při libovolné modelové teplotě odpovídající laboratorně změřené rychlosti růstu bublin je však třeba získat teplotní závislost obou konstant charakterizujících přímkovou závislost $\omega_{opt}\tau_{opt}$ na plnění V/V_0 ve tvaru:

$$\omega_{opt}\tau_{opt} = k(t) \frac{V}{V_0} + q(t) \quad (3)$$

kde : ω_{opt} je optimální úhlová rychlost [rad.s^{-1}] rotace válce odstředivky, τ_{opt} je optimální doba [s] odstranění bubliny z taveniny [s], $k(t)$ je konstanta [rad] závislá na teplotě, V je množství [m^3] taveniny ve válci odstředivky, V_0 je objem [m^3] válce odstředivky, V/V_0 je plnění válce odstředivky taveninou, $q(t)$ je konstanta [rad] závislá na teplotě.

Příslušná hodnota ω_{opt} v daném případě se pak získá z hodnoty $\omega_{opt}\tau_{opt}$ vypočtené z rovnice (3) při již známé hodnotě τ_{opt} z rovnice (2). Současně se pro kontrolu vypočte průměrný odstředivý tlak u pláště válce odpovídající minimu, tj. optimální úhlové rychlosti rotace, podle vztahu:

$$p_w = \frac{\rho \omega_{opt}^2 (r_0^2 - \bar{r}_h^2)}{2} \quad (4)$$

kde : p_w je tlak [Pa] způsobený odstředivou silou na plášť válce o poloměru r_0 [m], ω_{opt} je úhlová rychlost [rad.s^{-1}] rotace v optimu, ρ je hustota [kg.m^{-3}] taveniny a $\bar{r}_h$ je průměrný poloměr [m] zakřivené hladiny.

Je třeba vzít v úvahu, že místní tlak na plášť válce bude o něco větší než vypočtený v místě, kde startuje kritická bublina, tedy u dna válce v důsledku zakřivení hladiny. Výpočet tlaku se provádí jen pro kontrolu, zda za daných optimálních podmínek nedochází k příliš vysokému tlaku na plášť válce (tento tlak může být pro daný válec dán předepsanou hodnotou).

Konkrétní postup **stanovení optimálních podmínek odstředování** pro daný případ je tedy tento:

1. Laboratorním měřením je zjištěna teplotní závislost průměrné rychlosti růstu bublin za dané teploty nebo při více teplotách (teplotní závislost). Teplotní závislost průměrné rychlosti růstu bublin, $\dot{a}$, se vyjádří empirickou rovnicí, např. polynomického nebo exponenciálního typu jako v následujícím příkladu modelové taveniny:

$$\dot{a}[\text{m/s}] = \exp \left[18.969 - \frac{58544}{t+273.15} \right] \quad t \in (1350; 1550)^\circ\text{C} \quad (5)$$

kde : $\dot{a}$ je průměrná rychlost [m.s^{-1}], růstu bublin t je teplota [$^\circ\text{C}$].

- Ze získané teplotní závislosti se odečte hodnota rychlosti růstu bublin při dané teplotě a z grafu v obrázku 12 nebo z rovnice (1) se pro tuto rychlost růstu bublin odečte příslušná teplota, která odpovídá teplotě modelové taveniny, při níž má modelová tavenina stejnou rychlost růstu bublin jako tavenina aplikovaná.

2. Volíme některé parametry odstředování. Obvykle je zvoleným parametrem teplota odstředování plynoucí z podmínek provozování celého tavícího procesu a poloměr rotujícího válce r_0 , který je dán technickými možnostmi konstruktérů a uspořádáním celého zařízení. Dále je třeba zjistit průměrnou tloušťku vrstvy taveniny v rotujícím válci, která by odpovídala našim nárokům na výkon zařízení. Pro tento účel je třeba odhadnout plnění válce taveninou V/V_0 v povoleném rozmezí 0,25 až 0,75. Při zvoleném plnění válce (doporučuje se použít jako první hodnotu $V/V_0 = 0,5$) se vypočte průměrná tloušťka vrstvy taveniny podle rovnice:

$$\bar{\delta} = r_0 \left[1 - \left(1 - \frac{V}{V_0} \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

kde : $\bar{\delta}$ je průměrná tloušťka [m] vrstvy skla na plášti válce, r_0 poloměr [m] válce, V/V_0 je plnění válce odstředivky taveninou.

3. Odečte se nebo vypočte se hodnota τ_{opt} pro danou hodnotu kritické velikosti ($a_0 = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ nebo $1 \times 10^{-4} \text{ m}$) bubliny z grafů na obrázku 7-9 nebo z empirických rovnic získaných zpracováním přímkových závislostí τ_{opt} na průměrné tloušťce vrstvy. Tyto rovnice mají formální tvar rovnice (2), při čemž parametry přímek vyhovují rovnicím:

Pro $a_0 = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ a směrnici máme z modelových pokusů:

$$k_{\tau_{opt}} = 63,42 \exp \left(\frac{830,3}{t-1238,3} \right) \quad (7)$$

kde : $k_{\tau_{opt}}$ je konstanta [s.m^{-1}], t je teplota [$^\circ\text{C}$].

Pro úsek na ose y:

$$q_{\tau_{opt}} = 0; t \in \langle 1400; 1550 \rangle, q = 30t - 42000; t \in \langle 1350; 1400 \rangle \quad (8)$$

kde: $q_{\tau_{opt}}$ je konstanta [s], t je teplota [$^{\circ}\text{C}$].

Pro $a_0 = 1 \times 10^{-4}$ m činí směrnice

$$k_{\tau_{opt}} = 39,65 \exp\left(\frac{1007,7}{t - 1216,6}\right) \quad (9)$$

5 kde: $k_{\tau_{opt}}$ je konstanta [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$], t je teplota [$^{\circ}\text{C}$],

$$q_{\tau_{opt}} = \frac{-5.071t}{t - 1348.6} \quad (10)$$

kde: $q_{\tau_{opt}}$ je konstanta [s], t je teplota [$^{\circ}\text{C}$].

Po získání hodnoty τ_{opt} je dobré se přesvědčit o výkonnosti zařízení výpočtem efektivního výkonu zařízení, kterým je výraz:

$$10 \quad \dot{V}_{ef} = \frac{V}{\tau_{opt}} \quad (11)$$

kde: $\dot{V}_{ef}$ je efektivní výkon [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] zařízení, V je objem [m^3] válce odstředivky, τ_{opt} je optimální doba [s] odstranění bubliny z taveniny.

Hodnota $\dot{V}_{ef}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] po dosazení hodnot pro V a τ_{opt} závisí na plnění válce přibližně podle

$$15 \quad \dot{V}_{ef} = konst \frac{V/V_0}{\left[1 - \left(1 - \frac{V}{V_0}\right)^{1/2}\right]} \quad (12)$$

kde: $\dot{V}_{ef}$ je efektivní výkon [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] zařízení, V/V_0 je plnění válce odstředivky taveninou.

Tato funkce má lehce klesající charakter s rostoucím plněním válce, pokles efektivního výkonu od plnění 0,25 k plnění 0,75 je 19,6%, při plnění 0,5 činí pokles pouze 8,5%

20 Proto se doporučované plnění válce pohybuje kolem 0,5, při menším plnění se sice lehce zvětší efektivní výkon, ale válec bude nutné častěji vyprazdňovat a plnit taveninou.

4. Získá se hodnota ω_{opt} pro daný případ. Využije se situace, že průměrný součin $\omega_{opt} \tau_{opt}$ při dané teplotě a pro daný kritický rozměr bubliny roste v daném rozmezí plnění válce 0,25 až 0,75 lineárně s plněním válce jeho a příslušná hodnota se odečte z obrázku 11 (6) nebo rovnice (3). Pro obě konstanty lineární závislosti pak v daném rozmezí plnění platí empirické teplotní závislosti:

Pro $a_0 = 5 \times 10^{-5}$ m a směrnici máme z modelových výpočtů:

$$k_{\omega_{opt}\tau_{opt}} = 749,3 \exp\left(\frac{500,6}{t-1264,7}\right) \quad (13)$$

kde : $k_{\omega_{opt}\tau_{opt}}$ je konstanta [rad], t je teplota [°C]

Pro q z modelových výpočtů máme:

$$q_{\omega_{opt}\tau_{opt}} = \exp\left(5,23 + \frac{451,6}{t-1270,8}\right) \quad (14)$$

5 kde : $q_{\omega_{opt}\tau_{opt}}$ je konstanta [rad], t je teplota [°C].

Pro $a_0 = 1 \times 10^{-4}$ m pak dostáváme z modelových výpočtů:

$$k_{\tau_{opt}} = 915 \exp\left(\frac{436,6}{t-1271,1}\right) \quad (15)$$

kde : $k_{\tau_{opt}}$ je konstanta [rad], t je teplota [°C].

$$10 \quad q_{\omega_{opt}\tau_{opt}} = \exp\left(5,07 + \frac{410,5}{t-1275,4}\right) \quad (16)$$

kde : $q_{\omega_{opt}\tau_{opt}}$ je konstanta [rad], t je teplota [°C]

Ze získané hodnoty $\omega_{opt}\tau_{opt}$ se pak vypočte ω_{opt} při již známém τ_{opt} .

Tím jsou podmínky pro odstředování dané taveniny získány. Jsou dány sadou hodnot r_0 , V/V_0 , ω_{opt} , τ_{opt} a V_{ef} .

15

Uvedený postup neposkytne obvykle podmínky optima úplně přesně, ale najde oblast optimálních podmínek procesu odstředování, kterou nelze pouhým odhadem najít ani zcela přibližně vzhledem ke složitosti chování bublin ve skelné tavenině a za působení odstředivé síly. Poskytuje podmínky pro nejméně příznivý případ v daném uspořádání a pro dané parametry odstředování, pracuje tedy s určitou rezervou. Bez uvedené znalosti chování bublin vedou obvykle zákroky jen ke zhoršení situace. Naopak lze sledováním kvality skla za odstředivkou při aplikaci podmínek získaných pomocí tohoto modelu podmínky přiblížit optimu, pokud případ zlepšení vyžaduje:

- I. Je-li sklo za odstředivkou bez bublin, může existovat v procesu rezerva a je možno opatrně zvýšit otáčky válce nebo zvětšit plnění válce.
- 25 II. Vykazuje-li odstředěné sklo větší bubliny (průměr desetiny mm a větší), podmínky pro čerení jsou nedostatečné, nejvhodnějším prostředkem je snížení plnění válce taveninou, případně je možno opatrně zvyšovat otáčky válce.

III. Vykazuje-li sklo za odstředivkou více velmi malých bublin, jde velmi pravděpodobně o případ, kdy se velmi malé bubliny u pláště válce rozpouštějí, vhodným krokem je snížení rychlosti rotace nebo snížení plnění válce.

5 Při čerpení v laboratorním měřítu se uvedené nedokonalé podmínky projeví i v rozložení bublin v tavenině po vychladnutí. Vady podle bodu 2 se projeví v celé masě taveniny, případně u zakřivené hladiny, vady podle bodu 3 hlavně u pláště válce.

Při aplikaci výsledků je třeba ještě řešit i otázku efektivnosti použití odstředování za daných podmínek. Může se totiž stát, že podmínky pro aplikaci odstředování budou
10 poskytovat časy odstranění kritické bubliny vyšší nebo srovnatelné s případem, kdy nebyla rotace použita. Proto je třeba získanou hodnotu τ_{opt} pro kritickou bublinu vždy srovnat s hodnotou doby odstranění stejné bubliny za podmínky volného čerpení v gravitačním poli (válec nerotuje a tavenina vytvoří ve válci statickou vrstvu). Doba odstranění bubliny počátečního poloměru a_0 , rychlosti růstu $\dot{a}$ z vrstvy statické taveniny tloušťky / výstupem
15 ode dna je dána rovnicí:

$$l = \frac{2\rho g}{9\eta} \left(a_0^2 \tau + a_0 \dot{a} \tau^2 + \frac{\dot{a}^2 \tau^3}{3} \right) \quad (17)$$

kde: l je tloušťka [m], statické vrstvy taveniny, g je gravitační zrychlení [m.s^{-2}], ρ je hustota [kg.m^{-3}] taveniny, η je dynamická viskozita [Pa.s] taveniny, a_0 je počáteční poloměr [m] bubliny, $\dot{a}$ je rychlosti [m.s^{-1}] růstu bubliny, τ je doba [s] potřebná pro odstranění bubliny
20 ze skloviny.

Pokud je tedy doba τ získaná z rovnice (17) nižší nebo srovnatelná s hodnotou získanou pro získané podmínky odstředění, nemá odstředování smysl. Následující tabulka ukazuje hodnoty teplot, nad nimiž počíná být výhodnější při plnění válce $V/V_0 = 0,5$ použití rotace před prostým stoupáním kritické bubliny vrstvou skloviny 7. Jde o sadu válců, kde
25 $h_0 = 2r_0$. Hodnoty v tabulce označují teploty, při kterých je doba odstranění kritické bubliny ve válci stejná pro $\tau = 0\text{s}^{-1}$ a $\tau = \tau_{opt}$. Výsledky ukazují ve shodě s výsledky modelování, že odstředování je pro modelové sklo rychlé a výhodné nad teplotami 1400°C (pro jiná skla při rychlostech růstu bublin nad cca $4 \cdot 10^{-7} \text{m.s}^{-1}$).

Tabulka 2

r_0 [m]	0,10	0,175	0,25	0,375	0,50	0,75
t [$^\circ\text{C}$]	<1350	<1350	1357	1367	1376	1385

Tab. 2 ukazuje hodnoty teplot, nad nimiž je při plnění válce $V/V_0 = 0,5$ výhodnější použít odstředování za optimálních podmínek $\omega_{opt} \tau_{opt}$, než za prostého vzestupu kritické bubliny vrstvou skloviny $\underline{7}$, která by se ve válci ustavila bez rotace. Pro rozměry válců platí, že $h_0 = 2r_0$.

- 5 Obecně lze říci, že použití odstředování pro skla obsahující čerící činidla je méně výhodné nebo nevýhodné za nízkých rychlostí růstu bublin (za nízkých teplot) a při tlustých vrstvách skloviny $\underline{7}$ v rotujícím válci.

10 Příklad 2

Pro odstředění je k dispozici duté rotující těleso 1, ve tvaru bubnu o poloměru 0,25 m a výšce 0,5 m, uvedeného např. na obr. 4. Ve válci má být vyčerena sklovina 7 sodnodraselného křišťálu, který je do pece nakládán jako vsázka s 35 hmot. % vlastních střepů. Vyčerené sklo se vypouští do zásobníku skla pro zpracování po ochlazení na teplotu
15 ručního zpracování. Je třeba porovnat **dvě varianty čerícího procesu**, lišící se obsahem čeriva přidávaného ke vsázce a teplotou. Minimální skutečný výkon rotujícího bubnu byl předepsán na 5t/24h. Pro naplnění a vyprázdnění bubnu se rezervuje 1500 s. Je třeba rozhodnout, zda je použitelný případ s nižší teplotou částečně kompenzovanou vyšší
20 koncentrací čeriva. Pro oba kmeny s předepsaným množstvím čeriva a při předepsaných teplotách byly získány hodnoty průměrné rychlosti růstu bublin:

A. Sklo s 0,35 hmot.% Sb_2O_3 při teplotě 1450 °C má průměrnou rychlost růstu bublin
25 $\bar{\dot{a}} = 5,30 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$.

B. Sklo s 0,35 hmot.% Sb_2O_3 při teplotě 1420 °C má průměrnou rychlost růstu bublin
 $\bar{\dot{a}} = 3,20 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$.

1. Najdeme pro obě varianty příslušné teploty odpovídající stejné rychlosti růstu bublin
30 v modelovém skle. Použijeme rovnici (1):

Sklo A vykazuje pro modelové sklo teplotu čerení 1408 °C.

Sklo B vykazuje pro modelové sklo teplotu 1383 °C.

2. Zvolíme si plnění válce, které by se mělo pohybovat mezi 25 a 75% objemu válce. Zvolíme hodnotu $V/V_0 = 0,6$ a vypočteme průměrnou tloušťku vrstvy skla ve válci podle rovnice (6). Tloušťky vrstev pak jsou:

Sklo A i B vykazují průměrnou tloušťku vrstvy skla 0,092 m.

5

3. Z rovnic (7 a 8) zjistíme směrnici, případně úsek na ose y pro lineární závislost optimální doby odstranění kritické bubliny $a_0 = 5 \times 10^{-5}$ m a z rovnice (2) optimální dobu odstranění kritické bubliny, τ_{opt} :

Pro sklo A činí hodnota τ_{opt} 731 s.

10 Pro sklo B činí hodnota τ_{opt} 1326 s.

4. Zjistíme příslušné hodnoty ω_{opt} , optimální úhlové rychlosti rotace válce. Nejprve z rovnic (13 a 14) zjistíme směrnice a úseky na ose y lineární závislosti mezi $\omega_{opt} \tau_{opt}$ a plněním válce V/V_0 a z rovnice (3) vypočteme součin $\omega_{opt} \tau_{opt}$.

15 Pro sklo A je získaná hodnota $\omega_{opt} \tau_{opt}$ 17900 rad. S použitím hodnoty $\tau_{opt} = 731$ s dostáváme hodnotu otáček válce $\omega_{opt} = 24,5 \text{ rad.s}^{-1}$.

Pro sklo B je získaná hodnota $\omega_{opt} \tau_{opt}$ 40070 rad. S použitím hodnoty $\tau_{opt} = 1326$ s dostáváme hodnotu $\omega_{opt} = 30,2 \text{ rad.s}^{-1}$.

20 5. Zjistíme skutečný výkon čeracího bubnu. Jedna dávka vyčereného skla při daných rozměrech válce a jeho plnění 0,6 činí 135,4 kg skla. Při požadovaném výkonu 5t/24h je třeba vyčěřit 37 dávek skla za 24 h.

Výsledek :

25

Pro sklo A je doba optimální doba čerení rovna 731 s, doba rezervovaná na plnění a vyprázdnění válce je pak 1500 s, celková doba pro jednu dávku je tedy 2231 s. Na uskutečnění 37 dávek je pak třeba 82 547 s. Požadovaný výkon 5t/24 h je mírně překročen na 5,23 t/24 h, vzniká tedy mírná rezerva.

30

Pro sklo B je doba optimální doba čerení rovna 1326 s, celková doba pro uskutečnění jedné dávky pak 2826 s. Na uskutečnění 37 dávek je třeba 104 562 s, denní výkon bubnu by pak byl pouze 4,13 t/24 h. Sklo B tedy nesplňuje požadovanou podmínku výkonu odstředivky 5t/24 hod., a je tedy nutno použít sklo A a jeho příslušné podmínky odstředění.

35

Příklad 3

Sklárna má např. k dispozici 2 rotující válce (neznázorněno) o vnitřním poloměru r_0 0,5 m a s vnitřní výšce h_0 je 1 m. Vyráběné sklo je obalové sklo a předpokládá se, že dva válce budou odebírat sklovinu z kontinuální pece a dodávat vyčeřenou taveninu střídavě do zásobníku skla, které po ochlazení na teplotu zpracování bude strojově formováno. Pro celou pec je předepsán celkový tavicí výkon 70 t/24h, povolená tolerance výkonu jsou 3%. Maximální dosažitelná teplota ve válci je 1450°C, což je teplota dostatečná k efektivní funkci čeracího činidla síranu sodného. V laboratoři změřená průměrná rychlost růstu bublin při teplotě 1450°C činila $\bar{a} = 9 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$. Naplnění válce z pece a jeho vyprázdnění do pracovního zásobníku zabere 1800 s. Válce se přistavují střídavě ke společnému výtokovému otvoru z pece k nátoku a nad pracovní zásobník, nad nímž se čerí a vyprazdňují. Nad zásobníkem mohou být oba válce i současně. Je třeba stanovit plnění válce taveninou, optimální rychlost rotace válce a dobu odstranění všech bublin, při čemž předpokládaný poloměr nejmenší bubliny je $5 \times 10^{-5} \text{ m}$.

1. Najdeme příslušnou teplotu odpovídající stejné rychlosti růstu bublin v modelovém a aplikovaném skle. Použijeme rovnici (1). Teplota stejné rychlosti růstu bublin v modelovém skle činí 1440 °C.

2. V prvním kroku zvolíme plnění válce $V/V_0 = 0,5$ a vypočteme hodnotu průměrné tloušťky taveniny ve válci podle rovnice (6). Vypočtená průměrná tloušťka vrstvy taveniny ve válci činí 0,146 m.

3. Zjistíme hodnotu směrnice τ_{opt} versus $\delta \bar{\sigma}$ pomocí rovnice (7) a vypočteme τ_{opt} z rovnice (2). Dostáváme hodnotu optimální dobu čerání $\tau_{opt} = 462 \text{ s}$.

4. Z hodnot součinu $\omega_{opt} \tau_{opt}$ získáme hodnotu ω_{opt} . Nejprve z rovnic (13-14) získáme hodnotu směrnice závislosti mezi $\omega_{opt} \tau_{opt}$ a plněním válce V/V_0 i úsek na ose y a poté z rovnice (3) vypočteme příslušnou hodnotu $\omega_{opt} \tau_{opt}$ za daných podmínek rovnou 9575 rad. Při známé hodnotě τ_{opt} vypočteme ze součinu $\omega_{opt} \tau_{opt}$ optimální otáčky válce hodnotu $\omega_{opt} = 20,7 \text{ rads}^{-1}$.

5. Hodnota jedné dávky vyčeřeného skla jedním válcem činí 902,7 kg skla a toto množství je získáno za 462 s. Celková doba potřebná k naložení, vyčeření a vylití jedné dávky skla je potom $1800 + 462 = 2262 \text{ s}$. Jeden válec tedy je schopen za 24 hod vyčeřit $86400/2262 = 38,2$, tj. 38 dávek skla, tj. 34,3 t/24 h. Při společné funkci obou zásobníků má

pec čerící výkon 68,6 t/24 h. Při povolené toleranci 3% je výkon dostatečný a dané podmínky odstředivého čerení je možno přijmout.

5 Příklad 4

Je třeba odstranit bubliny z 10 kg speciálního boritokřemičitého skla v rotujícím tělese 1, např. v malém válci o poloměru 0,1 m a výšky 0,2 m. Sklo je v daném válci nejprve utaveno ze surovin a poté vyčerené. Válec je používán i pro odstranění bublin z již utavených skel, kdy jsou do něho dávkovány střepy nevyčereného skla. Laboratorním měřením byla při 1480 °C zjištěna průměrná hodnota rychlosti růstu bublin $\bar{a} = 1,5 \times 10^{-6} \text{ m}$. Jedná se o jednorázovou přípravu kvalitního skla.

Zvolí se následný postup:

15

1. Najdeme příslušnou teplotu odpovídající stejné rychlosti růstu bublin v modelovém a aplikovaném skle. Použijeme rovnici (1). Teplota stejné rychlosti růstu bublin v modelovém skle činí 1480°C.

20

2. Vypočteme plnění válce pro danou hmotu čereného skla v daném válci: $V/V_0 = 0,7$.

3. Podle rovnice (6) činí vypočtená průměrná tloušťka taveniny ve válci 0,045 m.

25

4. Zjistíme hodnotu směrnice τ_{opt} versus $\bar{\sigma}$ pomocí rovnice (7) a vypočteme τ_{opt} z rovnice (2). Dostáváme hodnotu $\tau_{opt} = 90 \text{ s}$.

30

5. Z hodnot součinu $\omega_{opt} \tau_{opt}$ získáme hodnotu ω_{opt} . Nejprve z rovnic (13-14) získáme hodnotu směrnice závislosti mezi $\omega_{opt} \tau_{opt}$ a plněním válce V/V_0 i úsek na ose y a poté z rovnice (3) vypočteme příslušnou hodnotu $\omega_{opt} \tau_{opt}$ za daných podmínek rovnou 5973 rad.

Při známé hodnotě τ_{opt} vypočteme ze součinu $\omega_{opt} \tau_{opt}$ hodnotu $\omega_{opt} = 66,4 \text{ s}^{-1}$.

Optimální úhlová rychlost rotace rotujícího tělesa 1 tedy činí $66,4 \text{ s}^{-1}$, což odpovídá 19,09 otáčkám za sekundu. Sklovina 7 je zbavena bublin v čase kratším než 2 min, konkrétně za 90 s.

Příklad 5

Máme najít teplotu provozování rotujícího válce o poloměru 0,3 m s výškou 0,4 m, který má mít výkon 7,5 t/24h sodnodraselného křišťálového skla. Doba plnění a vyprazdňování válce je 1500s.

Zvolí se následný postup:

1. Zvolíme hodnotu plnění válce $V/V_0 = 0,6$.
2. Zjistíme hmotnost jedné dávky taveniny , která v daném případě činí 156 kg skla.
3. Vypočteme počet potřebných dávek, aby se dosáhlo výkonu 7,5 t/24 h. Počet dávek činí $7500/156 = 48,1$ dávek.
4. Vypočteme hodnotu $\tau_{opt} = (86400 - 48,1 \times 1500)/48,1 = 296$ s.
2. Podle rovnice (6) vypočteme průměrnou tloušťku taveniny ve válci, která činí 0,11 m.
5. Z rovnice (2) vypočteme hodnotu směrnice $k = 296/0,11 = 2691$ s.m⁻¹. Tato hodnota směrnice odpovídá teplotě modelového skla 1460 °C.
6. Teplotě modelového skla 1460°C odpovídá průměrná rychlost růstu bublin $1,17 \times 10^{-6}$ m.s⁻¹.
7. Je třeba změřit v úzkém rozmezí teplot průměrnou rychlost růstu bublin a nalézt teplotu, která odpovídá průměrné rychlosti růstu bublin $1,17 \times 10^{-6}$ m.s⁻¹.

Tabulka 3 uvádí hodnoty veličin pro uvedené příklady provedení 2A, 2B, 3, 4 a 5:

Tabulka 3

Příklad číslo	r_0 [m]	h_0 [m]	V/V_0	da/dr [m/s]	T [°C]	ω_{opt} [rad/s]	τ_{crit} [s]	τ_0 [s]	P [t/den]
2A	0,25	0,50	0,6	$5,30 \times 10^{-7}$	1450	24,5	731	1500	5,23
2B	0,25	0,50	0,6	$3,20 \times 10^{-7}$	1420	30,2	1326	1500	4,13
1	2x0,50	1,00	0,5	$9,00 \times 10^{-7}$	1450	20,7	462	1800	68,6
3	0,10	0,20	0,7	$1,50 \times 10^{-6}$	1480	66,4	90	-	0,01
4	0,30	0,40	0,6	$1,17 \times 10^{-6}$	1460	26,6	296	1500	7,5

5 V Tabulce 3 představuje :

r_0 [m] poloměr celkového vnitřního prostoru V_0 válcového rotujícího tělesa 1,

h_0 [m] výšku celkového vnitřního prostoru V_0 válcového rotujícího tělesa 1,

V_0 [m³] celkový vnitřní prostor V_0 válcového rotujícího tělesa 1 v m³,

V [m³] prostor válcového rotujícího tělesa 1, naplněný sklovinou 7 v m³,

10 V/V_0 podíl válcovitého rotujícího tělesa 1 naplněný sklovinou 7 k celkovému vnitřnímu prostoru V_0 rotujícího tělesa 1,

da/dr derivace průměrné rychlosti [m.s⁻¹] růstu poloměru bublin ve sklovině 7, při dané teplotě v rotujícím tělese 1,

a je poloměr [m] bublin v metrech,

15 τ je čas [s] růstu bublin daného poloměru v sekundách,

ω_{opt} optimální úhlová rychlost [rad.s⁻¹] rotace válce v radiánech za sekundu,

t teplota [°C] skloviny 7 v rotujícím tělese 1 ve stupních Celsia,

τ_{crit} e doba [s] odstředění bubliny kritického poloměru 5×10^{-5} m při optimální rychlosti rotace,

τ_0 celková doba [s] naplnění a vyprázdnění rotujícího tělesa 1 v sekundách, a

20 P skutečný výkon čerání odstředováním skloviny v tunách za den v nerotujícím tělese 1 s ohledem na dobu potřebnou pro jeho naplnění a vyprázdnění.

Uvedená příkladná provedení nejsou omezující a jsou možné i jiné varianty a kombinace konstrukčního uspořádání rámci rozsahu patentových nároků.

Průmyslová využitelnost

Řešení je vhodné pro sklářský průmysl, pro kontinuální a zejména pro diskontinuální tavení s následným čerpením skla.

5

Vztahové značky

1 těleso

2 víko 2 tělesa

3 dno 3 tělesa

10

4 plášť 4 tělesa 1

5 nátokový otvor

6 výtokový otvor

7 sklovina

8 osa 8 tělesa 1

15

9 směr 9 nátoku skloviny 7

10 směr 10 výtoku skloviny 7

11 směr 11 rotace tělesa 1

PATENTOVÉ NÁROKY

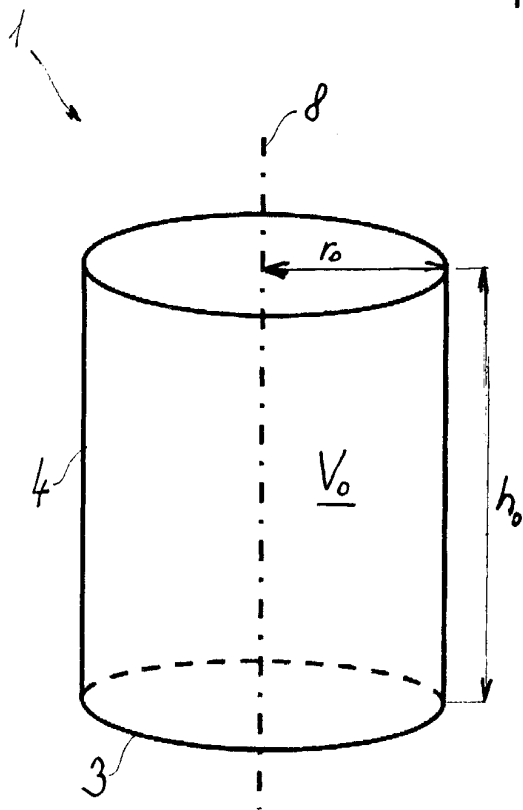
1. Způsob čerení skloviny odstředováním, při němž se účinkem odstředivé síly provádí separace bublin ze skloviny (7), který se provádí v zařízení, zahrnující nejméně jednu
 5 čerící odstředivku, obsahující rotující těleso (1) válcovitého tvaru, s obvodovým pláštěm (4), dnem (3) a případně víkem (2), vykazující osovou symetrii v ose (8) rotace rotujícího tělesa (1), rotující těleso (1) je vybaveno prostředky pro nátok a výtok skloviny (7),

vyznačující se tím, že

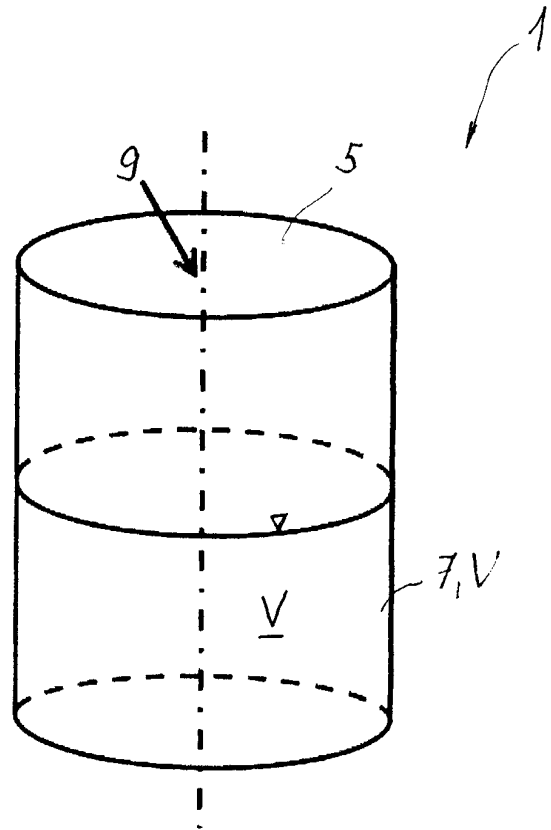
- odstředování skloviny (7) separováním bublin ze skloviny (7), aniž by přitom docházelo
 10 k rozpuštění bublin ve sklovině (7), se provádí
- ve sklovině (7) o teplotě v rozmezí $1000 \rightarrow 1600$, s výhodou $1200 \rightarrow 1500$ °C;
 - v rotujícím tělese (1) čerící odstředivky, kde celkový vnitřní prostor V_0 : je částečně naplněný sklovinou (7) určenou k čerení o obsahu V ; je spojený s okolní atmosférou pro únik bublin ze skloviny (7); vykazuje střední poloměr
 15 r_0 v rozmezí $0,05 \rightarrow 1$ m; a celkovou výšku h_0 v rozmezí $0,1 \rightarrow 1,5$ m; přičemž podíl obsahu V rotujícího tělesa (1) naplněného sklovinou (7) určenou k čerení je ku celkovému vnitřnímu obsahu V_0 rotujícího tělesa (1) v poměru $V/V_0 = 0,20 \rightarrow 0,80$;
 - při otáčkách rotujícího tělesa (1) čerící odstředivky při odstředování v rozmezí
 20 $10 \rightarrow 200$ rad.s⁻¹;
 - při průměrné rychlosti růstu bublin v odstředované sklovině (7) v rozmezí 5×10^{-8} m.s⁻¹ $\rightarrow$ 5×10^{-5} m.s⁻¹, s výhodou 1×10^{-7} m.s⁻¹ $\rightarrow$ 5×10^{-6} m.s⁻¹;
 - až do odstranění nejmenších bublin o poloměru v rozmezí 5×10^{-5} m až 1×10^{-4} m;

25 čímž se dosáhne toho, že celková doba odstředění i nejmenších bublin o poloměru v rozmezí 5×10^{-5} m až 1×10^{-4} m se pohybuje v časovém intervalu desítek až tisíc sekund.

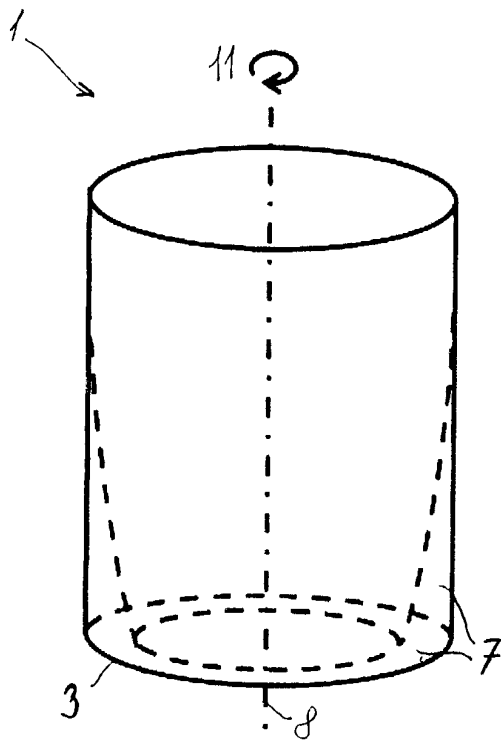
1/8



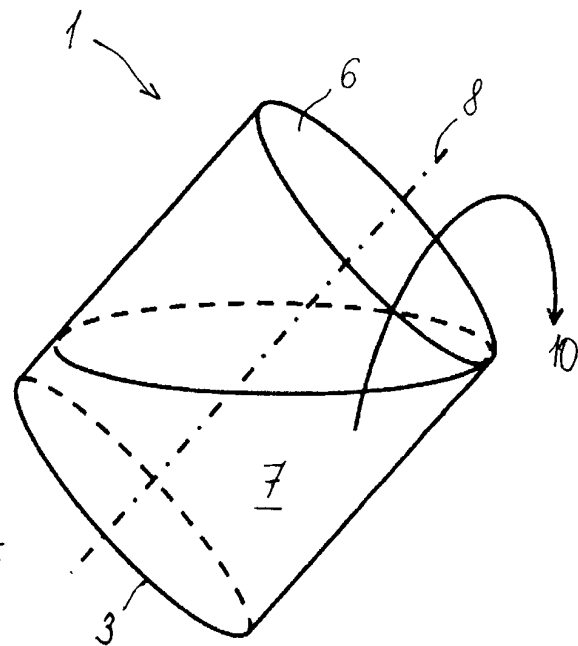
Obr. 1



Obr. 1a

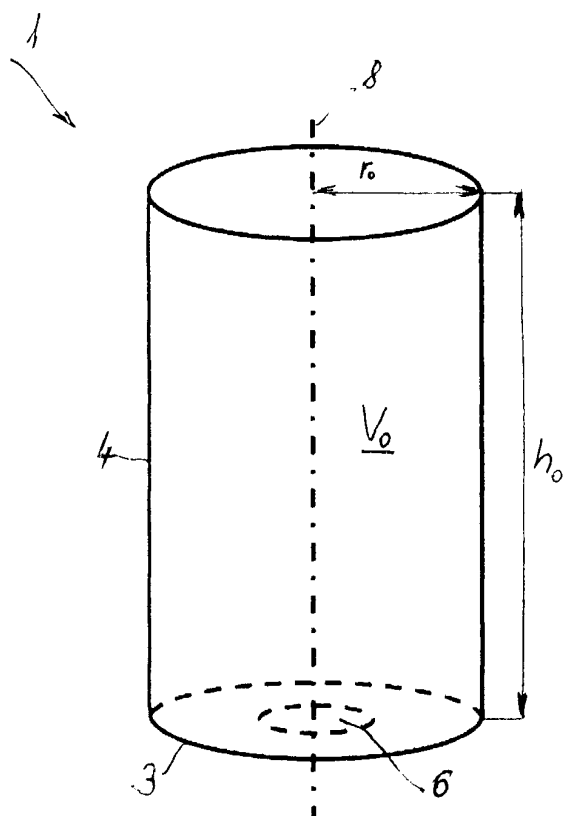


Obr. 1b

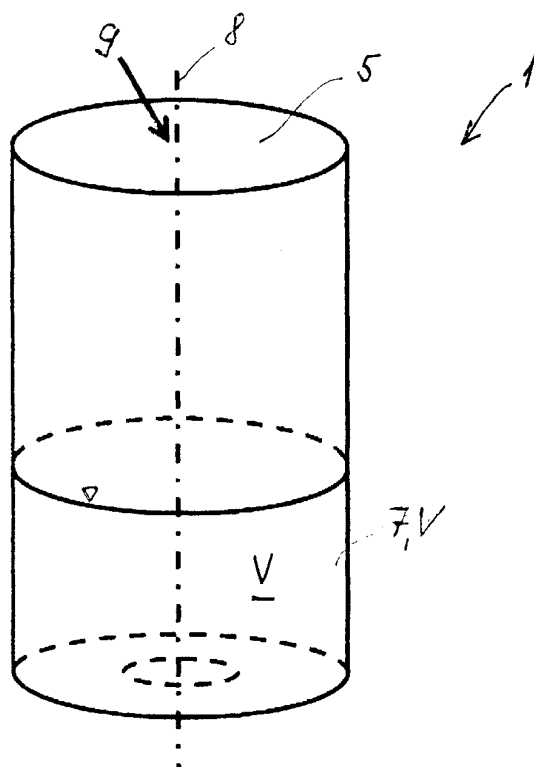


Obr. 1c

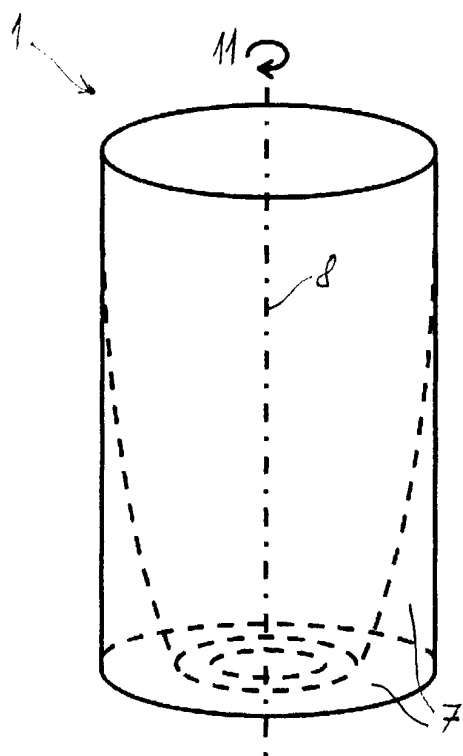
2/8



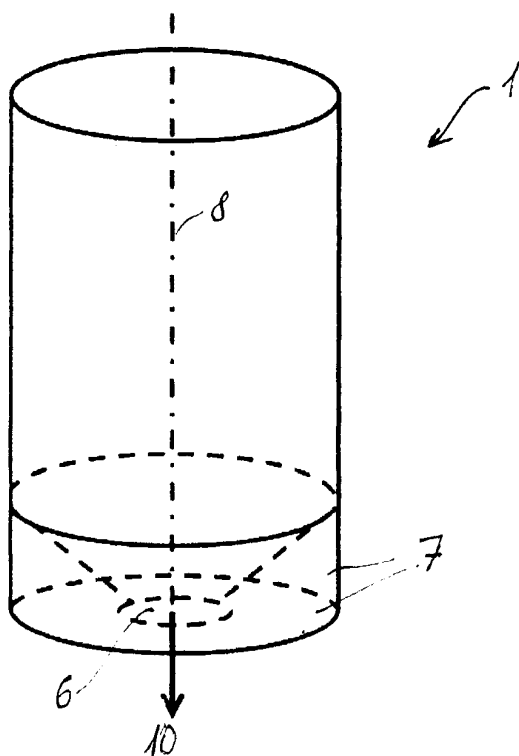
Obr. 2



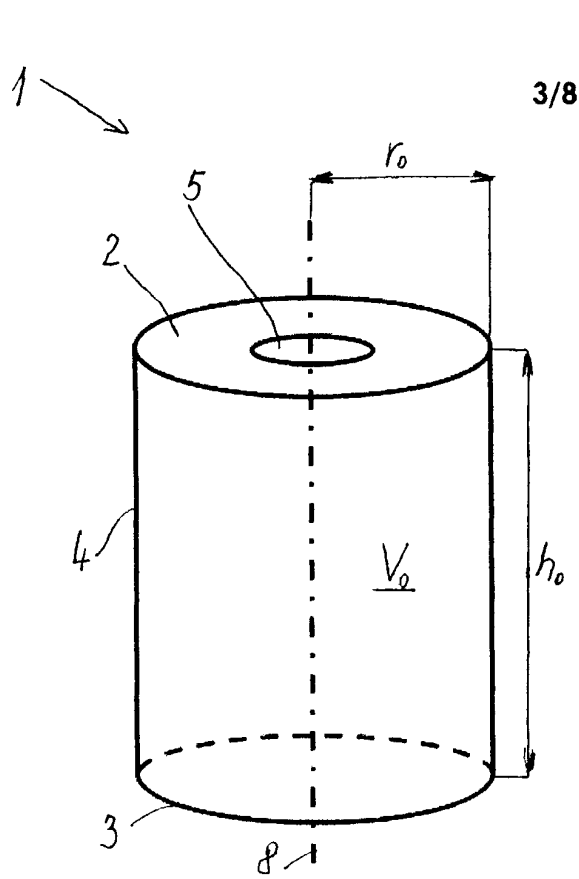
Obr. 2a



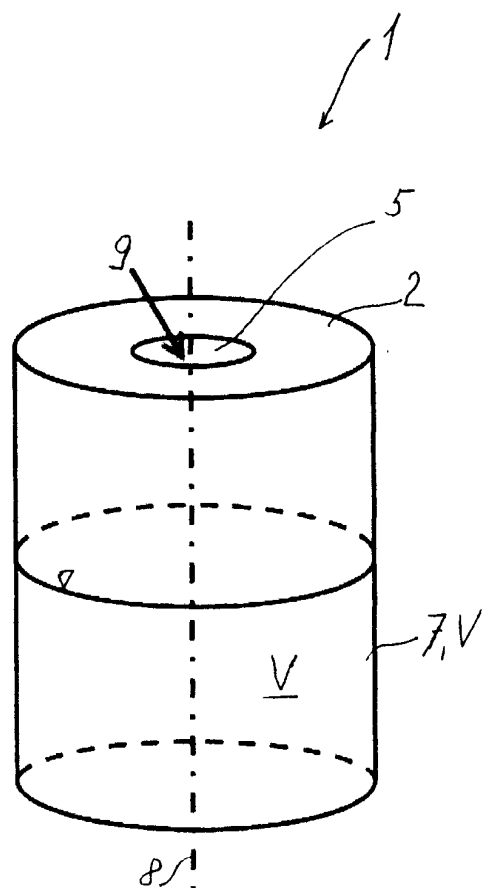
Obr. 2b



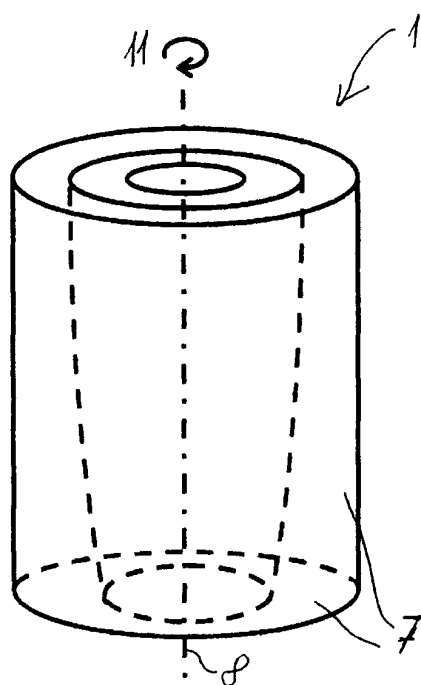
Obr. 2c



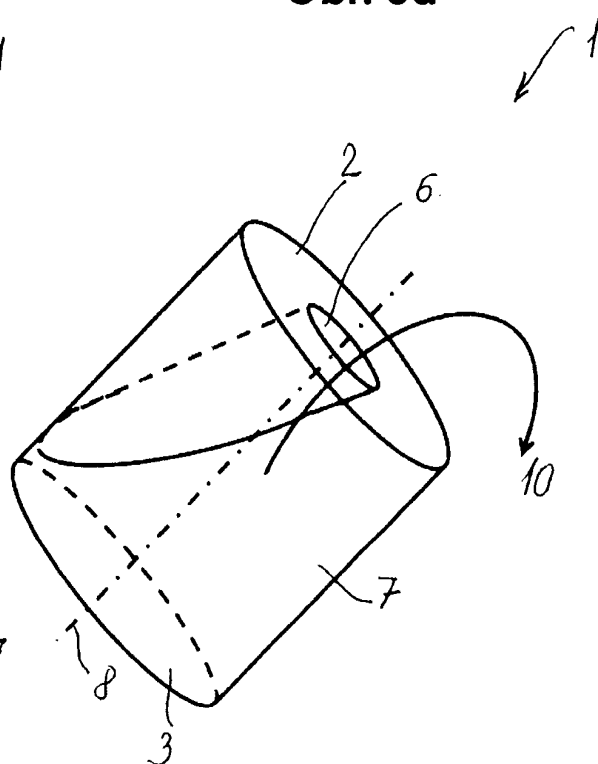
Obr. 3



Obr. 3a

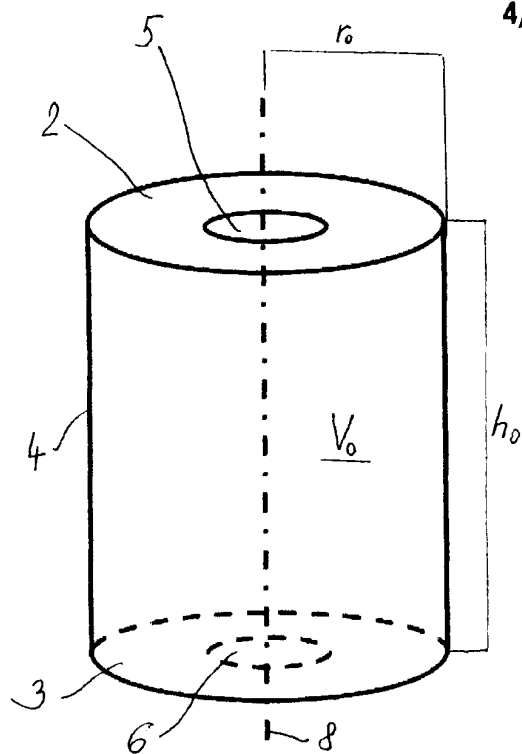


Obr. 3b

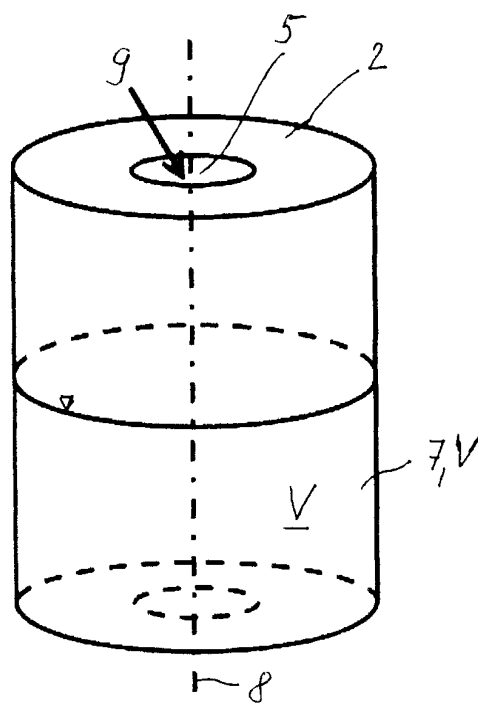


Obr. 3c

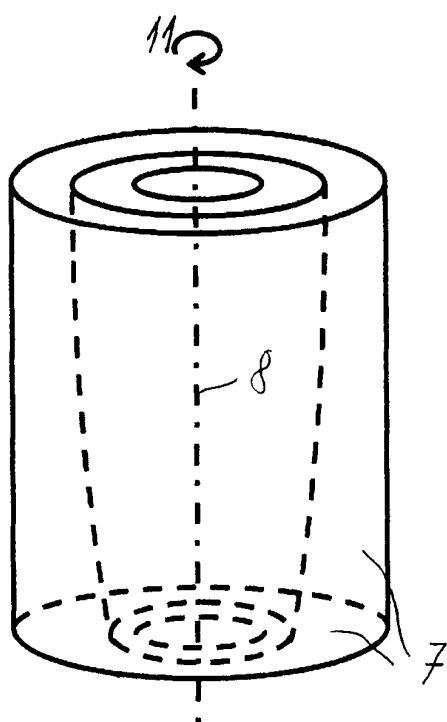
4/8



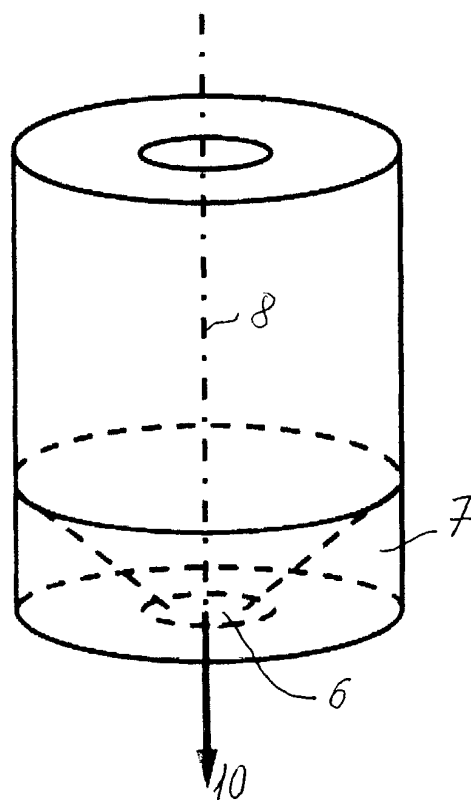
Obr. 4



Obr. 4a

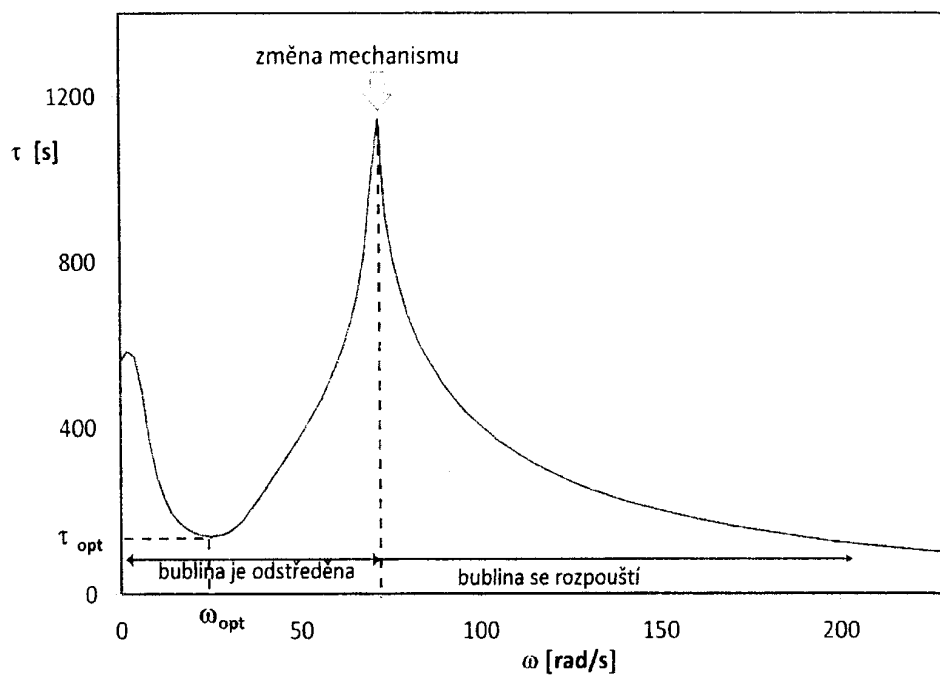


Obr. 4b



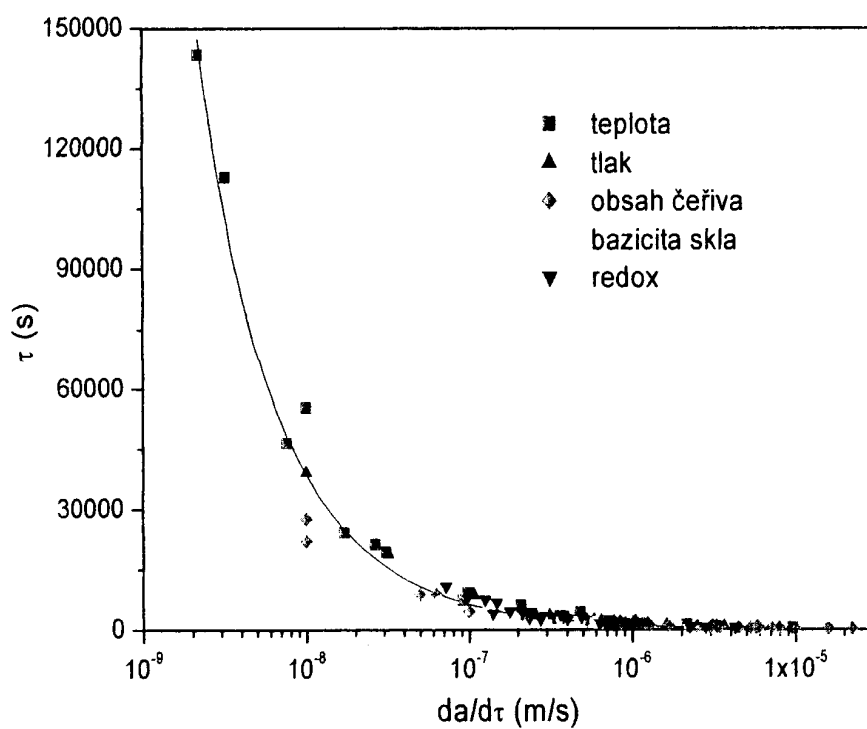
Obr. 4c

5/8



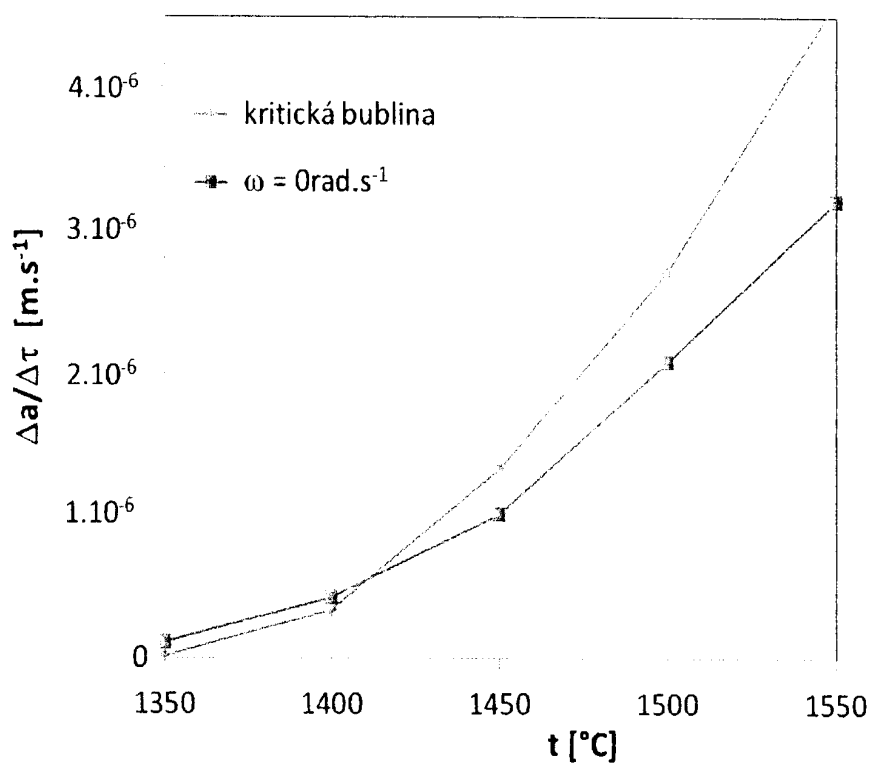
5

Obr. 5



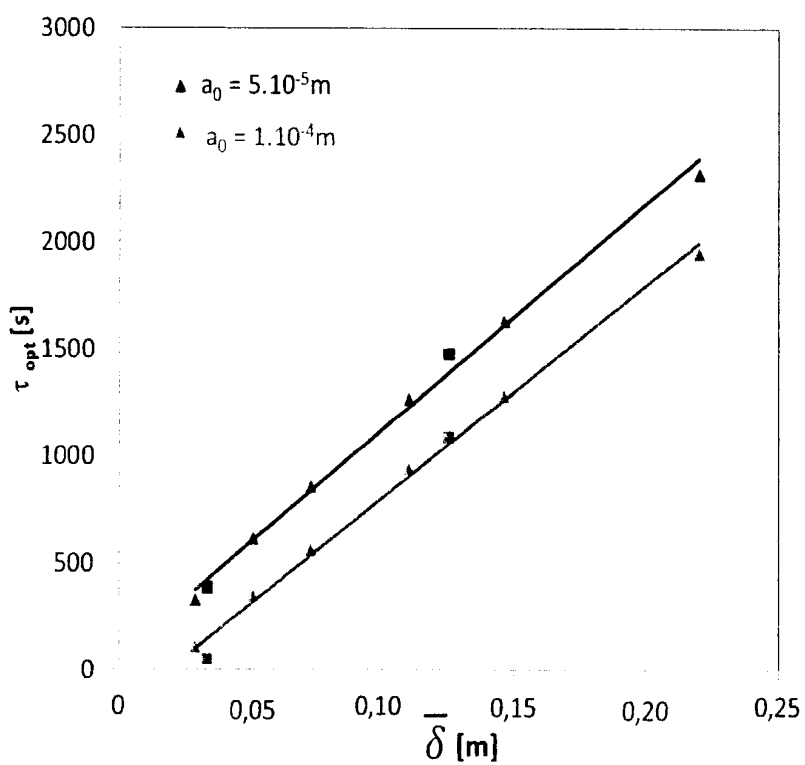
Obr. 6

6/8



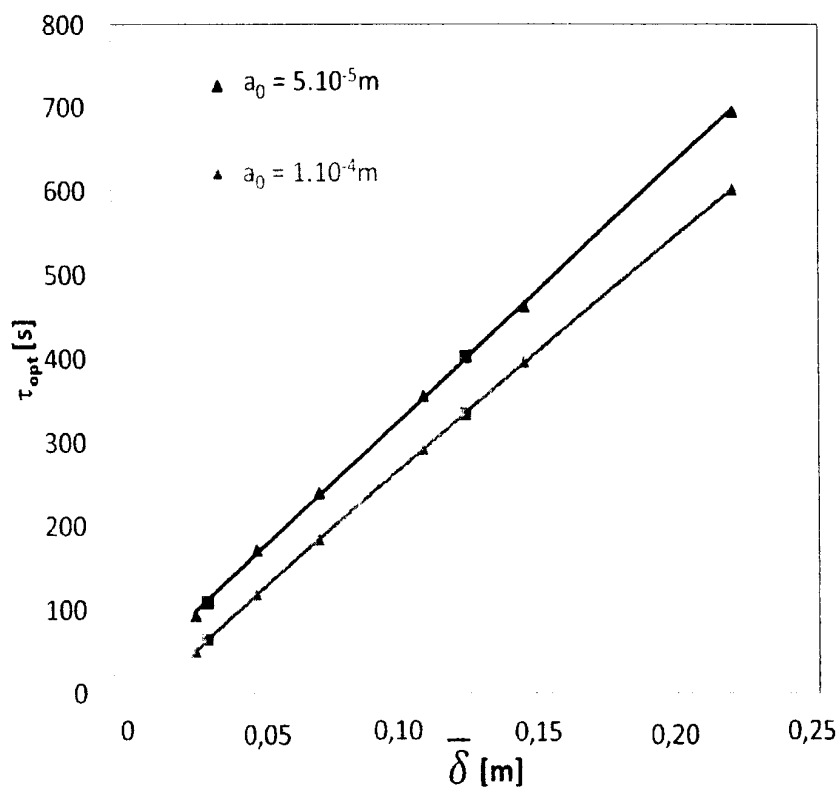
Obr. 12

5



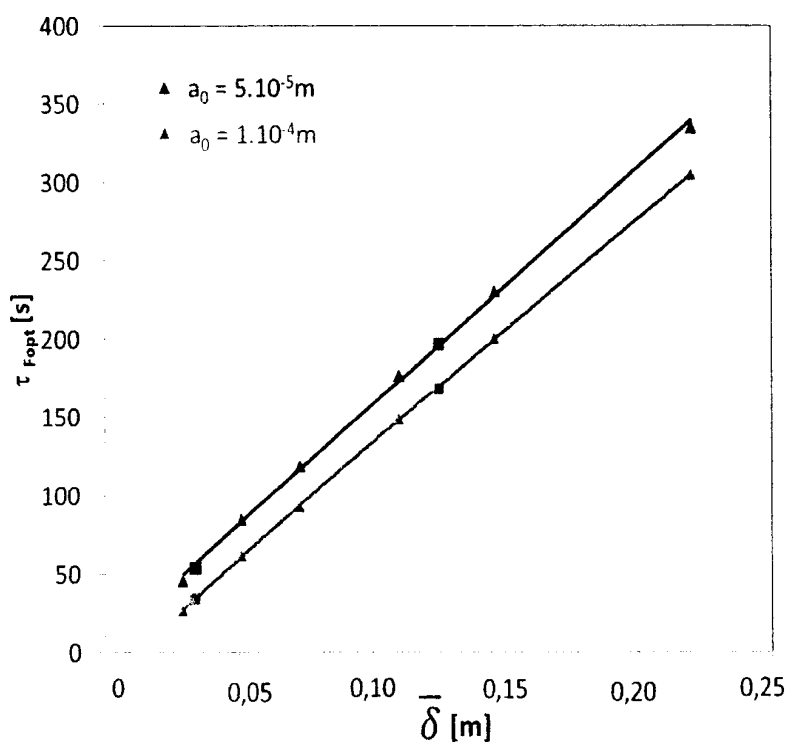
Obr. 7

7/8

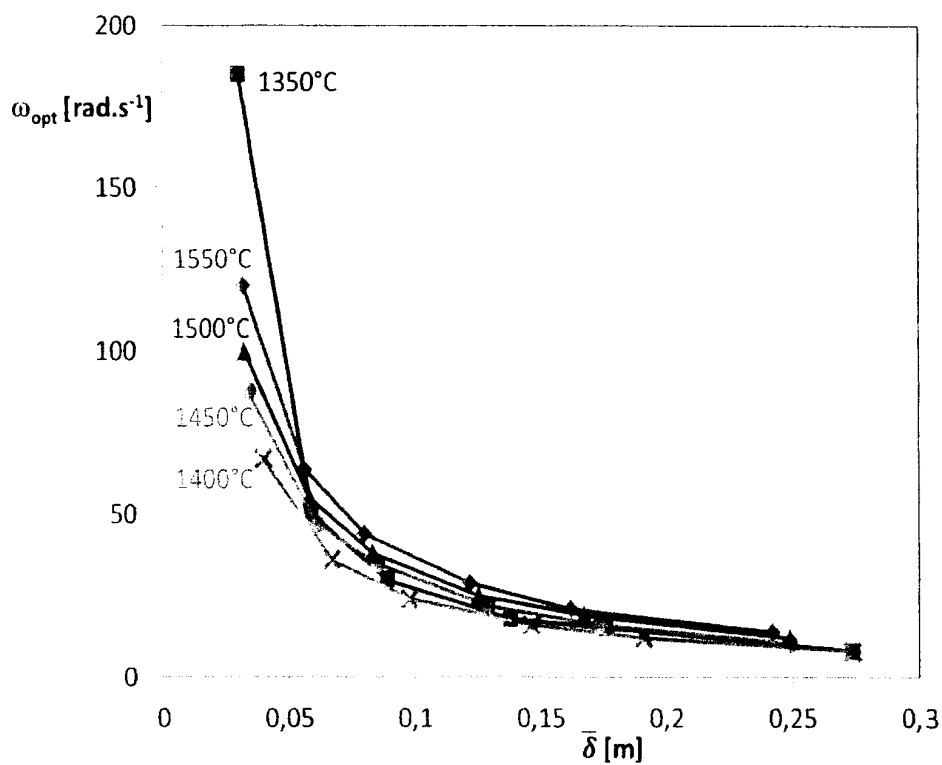


Obr. 8

5

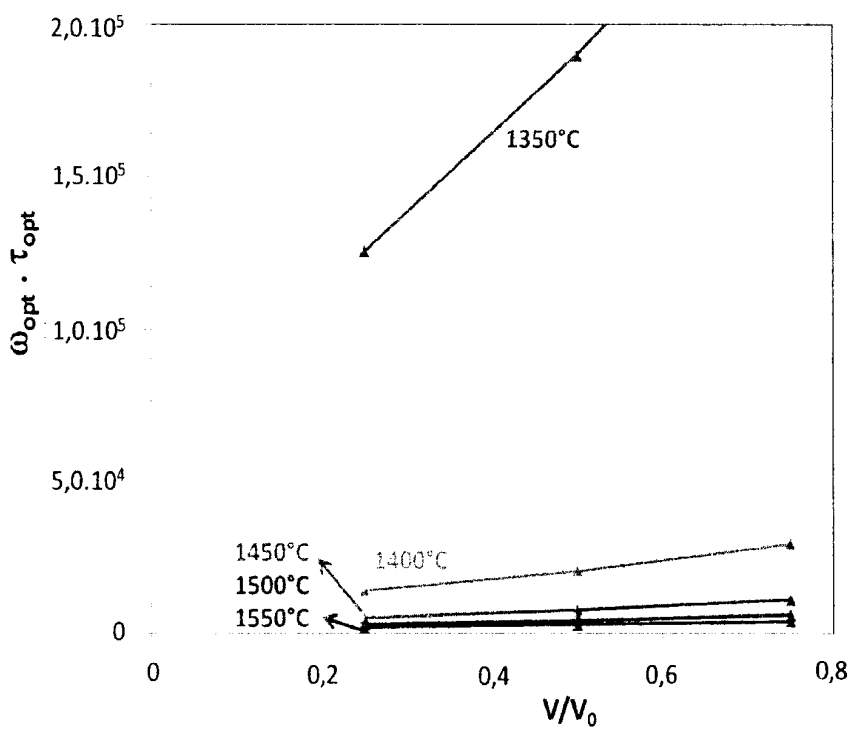


Obr. 9



Obr. 10

5



Obr. 11