(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 720 507**

(51) Int. Cl.:

C03B 5/04 (2006.01)
C03B 5/182 (2006.01)
C03B 5/23 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.04.2015** **PCT/FR2015/051107**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **05.11.2015** **WO15166172**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.04.2015** **E 15723265 (3)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2019** **EP 3137426**

(54) Título: **Proceso y dispositivo para fundir y refinar vidrio**

(30) Prioridad:

29.04.2014 FR 1453902
29.04.2014 FR 1453903

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.07.2019

(73) Titular/es:

SAINT-GOBAIN GLASS FRANCE (100.0%)
18 Avenue d'Alsace
92400 Courbevoie, FR

(72) Inventor/es:

MARIO, OLIVIER;
LE VERGE, ARNAUD y
COMBES, JEAN-MARIE

(74) Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 720 507 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Proceso y dispositivo para fundir y refinar vidrio

La invención se refiere a un proceso y dispositivo para fundir, refinar y acondicionar vidrio fundido que consumen poca energía y son capaces de suministrar un vidrio de alta calidad que puede, en particular, suministrarse a una cámara de flotación de vidrio con el fin de fabricar vidrio plano.

Un dispositivo para fundir y formar vidrio se compone en sucesión de una zona de carga, una zona de fusión y refinamiento, una zona de acondicionamiento y por último una zona de formación. La zona de carga sirve para introducir materia prima en el horno. La zona de fusión es el lugar donde la materia prima se transforma en un vidrio fundido. Con el fin de obtener un vidrio fundido de calidad óptima en términos de fusión, uniformidad y remoción de burbujas, es necesario lograr temperaturas muy altas en la zona de fusión, gracias a combustibles fósiles o energía eléctrica. La zona de acondicionamiento entonces sirve para enfriar el vidrio para llevarlo a la temperatura de formación, mucho menor que las temperaturas experimentadas por el vidrio durante su producción.

Un dispositivo para fabricar vidrio debe conducir a un vidrio de alta calidad, es decir, un vidrio que contiene tan poco como sea posible material sin fundir y la menor cantidad posible de burbujas, con una alta productividad pero con un consumo de energía y costo de construcción tan bajos como sea posible. El costo de construcción de tales instalaciones hace que la innovación en este campo sea difícil y lenta. Esta es la razón por la que los presentes inventores han llevado a cabo un estudio profundo de mecanismos de convección en el vidrio fundido que tienen lugar en las cuencas sucesivas que reciben el vidrio con el fin de encontrar las dimensiones y el modo de operación más adecuados.

El documento EP650934 muestra un dispositivo para fundir vidrio que comprende una cuenca de refinamiento y fusión de fondo plano que suministra a un canal de flujo que es suficientemente poco profundo para evitar que se forme una celda de recirculación de vidrio fundido. La cuenca de fusión y refinamiento es el asiento de dos bucles de circulación convectiva. No se proporciona ninguna cuenca de acondicionamiento aguas abajo de la zona de refinamiento. No existe contraflujo alguno del vidrio aguas abajo de la zona de refinamiento. Se crean defectos necesariamente aguas abajo de la zona de refinamiento.

El documento FR-A-2951156 muestra un horno de vidrio plano que comprende un depósito que contiene un baño de vidrio en fusión, un cuello, una salida por la que se evacúa el vidrio en fusión, un bucle de recirculación aguas abajo del vidrio en fusión que se forma en el baño entre una zona interna del horno más caliente y la salida a una temperatura menor, atravesando este bucle el cuello, el horno comprende un medio de ajuste del ancho de paso del vidrio en el bucle de recirculación aguas abajo, estando este medio de ajuste sumergido en el baño y extendiéndose verticalmente por la mayor parte de la profundidad del baño.

El documento EP2168923 muestra un dispositivo para preparar vidrio fundido que comprende un horno de fusión y refinamiento cuyo fondo se eleva gradualmente entre una pequeña zona de fusión y una zona de refinamiento grande mediante una pluralidad de escalones. El flujo de la salida de vidrio de este horno es un flujo de pistón.

El documento FR2299277 muestra un dispositivo para fundir y refinar vidrio que comprende una cuenca de acondicionamiento en cuyo interior interviene un flujo de pistón. Aunque un contraflujo hacia la zona de refinamiento interviene parcialmente en la cuenca de refinamiento, esta zona de contraflujo es demasiado corta para obtener un efecto suficiente teniendo en cuenta la probabilidad de aparición de defectos en el resto del dispositivo. Además, esta zona es tan corta que debe ser necesario contener medios de refrigeración poderosos antes de que el vidrio penetre en la zona de flujo de pistón, lo que también puede considerarse para formar el inicio de un canal.

El documento US3261677 muestra un horno que comprende una zona de refinamiento que es tan poco profunda que ningún contraflujo puede tener lugar en la misma. La ausencia de contraflujo hacia la zona de fusión es poco propicia para la digestión de defectos. En esta ubicación muy poco profunda, el fondo se encuentra necesariamente a una temperatura muy alta (de alrededor de 1470°C) promoviendo el desgaste de materiales refractarios del fondo y es propicio para la generación de defectos en el vidrio.

El documento CN201250173Y muestra un dispositivo para fundir vidrio que comprende un horno de fusión seguido por un cuello y después por una sección de enfriamiento. El fondo del horno comprende un escalón de 250 a 350 mm. Un punto caliente se encuentra en el centro del baño de fusión. Se detiene el contraflujo desde el punto caliente hasta la sección de enfriamiento.

El documento CN102320721 muestra un horno que suministra directamente (sin extremo de trabajo) a un canal biselado como se ve desde arriba. No existe contraflujo en el canal. El vidrio se encuentra necesariamente demasiado caliente en la entrada de este canal. Se requerirá un soplado muy intenso para enfriar suficientemente el vidrio en este canal y esto resultará en la calidad óptica del vidrio degradada. De manera específica, la intensidad de soplado ΔSouff será de alrededor de 193% si se expresa como en los ejemplos de la presente solicitud.

Los gradientes de temperatura en el horno conducen a un flujo de convección del vidrio en el horno. De este modo, un bucle o celda de convección comienza con la fusión, del lote cargado, sumergiéndose a continuación hacia el

fondo del horno hasta el punto caliente en el fondo donde el vidrio se eleva hacia la superficie. Un segundo bucle de circulación, aguas abajo del primero, denominado bucle aguas abajo, puede formarse desde el punto caliente del fondo del horno de fusión/refinamiento, que se eleva y circula en la superficie hasta la salida de horno y que sale del horno con el fin de pasar en la cuenca de acondicionamiento. El vidrio en el horno está más caliente que en la cuenca de acondicionamiento. Es recomendable que la temperatura de fondo en el horno de fusión y refinamiento sea menor que 1400°C. Gracias a una profundidad suficiente del vidrio en el horno de fusión y refinamiento, permitiendo dicha profundidad la formación de celdas de recirculación, la temperatura del fondo puede permanecer por debajo de 1400°C.

Los términos aguas arriba y aguas abajo en la presente solicitud desde luego se refieren a la dirección de flujo del vidrio, el cual fluye desde aguas arriba hasta aguas abajo.

Los términos “celda” y “bucle” son sinónimos en el presente contexto. La posición de los bucles de recirculación del vidrio con frecuencia se ha descrito en patentes de técnica anterior pero se ha prestado muy poca atención a su intensidad y a sus interacciones mutuas. Ahora se ha descubierto que un bucle de recirculación puede tener un flujo que representa varias veces la demanda del dispositivo de fusión y que la modificación de un bucle de recirculación en términos de su posición o su intensidad tiene repercusiones en las características de un bucle de recirculación próximo. De este modo, se ha observado que los parámetros geométricos del dispositivo para fabricar vidrio fundido y la manera en que tal dispositivo se opera, impactan directamente en la posición y equilibrio respectivo de las dos celdas, y en su intensidad convectiva. Cuanto mayor sea la intensidad de un bucle de recirculación, más energía requiere este mismo bucle a partir del horno. A estos fenómenos de recirculación en el vidrio fundido se agregan aquellos relacionados con la evolución de burbujas en el vidrio, las cuales se desea que se remuevan al hacer que emigren hacia la superficie del vidrio, pero que también pueden absorberse por el vidrio en zonas más frías. Además, la concentración de agente de refinamiento (con más frecuencia sulfato de sodio) disminuye a medida que el vidrio fluye debido a que se consume gradualmente, y en una tasa que incrementa a medida que la temperatura del vidrio incrementa. Antes de llegar al dispositivo de formación, en particular de vidrio plano, el vidrio debe enfriarse a una temperatura apropiada para su formación. Éste es el papel desempeñado por una cuenca de acondicionamiento. La cuenca de acondicionamiento puede comprender sólo un único compartimento, pero en general comprende al menos dos compartimentos. La cuenca de acondicionamiento por lo tanto puede comprender una pluralidad de compartimentos dispuestos en serie uno detrás del otro y en los que el vidrio puede pasar en sucesión. De manera más general, la cuenca de acondicionamiento consiste de dos compartimentos sucesivos, el primero de estos se denomina el cuello o cintura y el segundo de estos se denomina el extremo de trabajo. Generalmente, el horno de fusión/refinamiento se abre directamente en el cuello. Generalmente, el cuello se abre directamente en el extremo de trabajo. Un cuello no contiene quemadores y por lo general no tiene medios de calentamiento. El extremo de trabajo se equipa con un dispositivo para soplar aire a la superficie del vidrio con el fin de llevar al vidrio a la temperatura correcta. El aire soplado en el extremo de trabajo por lo general pasa en el cuello que lo precede, de este modo también contribuye con el enfriamiento del vidrio. La sección de paso y el ancho de paso del vidrio disminuye en gran medida cuando se pasa del horno a la cuenca de acondicionamiento, la cual por lo general comienza con un cuello, y aumenta en gran medida cuando se pasa de un cuello a un extremo de trabajo. La sección de paso del vidrio se relaciona con la geometría del dispositivo. Esto es especialmente cierto con respecto a la altura del vidrio debido a que tal dispositivo tiene un depósito dedicado, construido a partir de bloques refractarios denominados “bloques de depósito”, para hacer contacto con el vidrio y contenerlo. La altura de vidrio en el dispositivo por lo general corresponde con la distancia entre el nivel superior de los bloques de depósito disminuido por un margen de seguridad por lo general comprendido entre 30 y 130 mm, y el nivel del fondo. Aquellos con experiencia en la técnica denominan el conjunto de bloques que hacen contacto con el vidrio como “infraestructura”. El término “superestructura” se utiliza para referirse a los materiales dispuestos sobre la infraestructura. El material de la superestructura, que se ubica por encima de los bloques de depósito de la infraestructura y que no hace contacto con el vidrio pero sí con la atmósfera del horno, por lo general tiene una naturaleza diferente a la de los bloques de depósito de la infraestructura. Incluso si el material utilizado por la superestructura es idéntico al de la infraestructura, aquellos con experiencia en la técnica diferenciaran inmediatamente entre estas dos porciones de la construcción. La presencia de bloques de depósito es característica de un material elaborado para recibir el vidrio fundido y se refiere a la longitud total del dispositivo, es decir, tanto el horno como la cuenca de acondicionamiento. De este modo, en el dispositivo y el proceso de acuerdo con la invención, la altura de vidrio (utilizada en el cálculo de la sección de paso del vidrio) por lo general es igual a la altura de los bloques de depósito disminuida por 30 a 130 mm, en particular 80 mm (la mitad del margen de 30 a 130 mm). De este modo, la presente solicitud también se relaciona con un dispositivo cuyos bloques de depósito son tales que existe un nivel de la superficie del vidrio a una distancia comprendida entre 30 y 130 mm bajo el nivel superior de los bloques de depósito, de modo que el valor K de acuerdo con la invención es mayor que 3.5 y de preferencia mayor que 5.5 e incluso de más preferencia mayor que 7.5. En particular, el valor K puede ser mayor que 9, o incluso mayor que 10.5, o incluso mayor que 13.

Después de la cuenca de acondicionamiento, el vidrio pasa en un canal que suministra por sí mismo a un dispositivo de formación. La altura (o profundidad) del vidrio en el canal es mucho menor que su altura (o profundidad) en la cuenca de acondicionamiento justo antes del canal, de modo que ninguna recirculación de vidrio tiene lugar en el canal. Por lo tanto, el flujo de vidrio en el canal es un flujo de pistón. Esto no evita que el vidrio pueda seguir trayectorias curvas en este canal, tal como en forma de bobina; sin embargo, la trayectoria siempre va de aguas

arriba a aguas abajo. Este canal es de manera ventajosa tan corto como sea posible. En efecto, los defectos que son propensos a aparecer en el canal debido al contacto entre el vidrio y las paredes y el fondo del canal se incorporarán inevitablemente en el vidrio que pasa en el dispositivo de formación debido a que no existe contraflujo en el canal. Por lo tanto, la probabilidad de que aparezcan defectos en el canal disminuye si la longitud del canal disminuye. La longitud del canal por lo general se comprende en el margen que se extiende de 0.3 a 10 m y de manera más general en el margen que se extiende de 0.8 a 6 m. El extremo aguas abajo del canal corresponde con la abscisa, en el eje longitudinal del dispositivo, en el que el vidrio rompe el contacto con el fondo refractario del canal. En el caso de una cámara de flotación para elaborar vidrio plano, esto corresponde con el extremo del borde a través del cual el vidrio se vierte en el metal fundido. En el caso de un dispositivo de laminación en que el vidrio se pasa entre rodillos de laminación, esto corresponde con el punto donde el vidrio hace contacto con un rodillo de laminación. El canal puede corresponder especialmente con la porción 14 de las Figs. 1 y 2 del documento EP650933, o con el canal en las Figs. 1 y 2 en el documento EP616983 A1, con o sin sus agitadores 15 a 18 y cuyas porciones 13, 14 medias se acortarán o incluso se retirarán. Además, el fondo del canal puede ser ligeramente ascendente hacia la dirección aguas abajo con una pendiente comprendida entre 0 y 6° a la horizontal, por lo general sin que el ascenso supere 100 mm.

Con respecto al paso del vidrio desde el horno de fusión/refinamiento hacia la cuenca de acondicionamiento, pudiendo comenzar esta última con un compartimento de tipo cuello, el ancho de paso del vidrio se disminuye bruscamente por al menos 30% y por lo general por al menos 50% por las paredes aguas abajo del horno que forman un ángulo con la dirección de flujo del vidrio de al menos 40° e incluso al menos 60° y por lo general de 90°. Esta disminución se obtiene con las dos paredes ubicadas en cada lado del eje longitudinal medio del dispositivo. La cuenca de acondicionamiento es más larga que 2 m de longitud, y por lo general más larga que 5 m de longitud, en la dirección de flujo general del vidrio, es decir, desde aguas arriba hasta aguas abajo a lo largo del eje longitudinal medio del dispositivo.

Viniendo desde el horno, la entrada de la cuenca de acondicionamiento por lo general se protege por una pantalla térmica que se desciende desde el techo hasta el vidrio. Generalmente, esa pantalla no se sumerge en el vidrio. Sirve principalmente para separar la atmósfera caliente del horno de fusión/refinamiento de la atmósfera fría aguas abajo del horno y marca el inicio de la cuenca de acondicionamiento. Sin embargo, es posible que la pantalla térmica se sumerja en el vidrio.

La cuenca de acondicionamiento puede comprender un extremo de trabajo equipado con un dispositivo para soplar el vidrio. Por lo general el extremo de trabajo se precede por un cuello. El extremo de trabajo y el cuello que lo precede difieren entre sí en un incremento neto del ancho de paso del vidrio, como se ve desde arriba. Este incremento de ancho por lo general se obtiene con paredes que forman un ángulo de más de 40° y por lo general más de 60° y por lo general un ángulo de 90° con las paredes laterales del cuello. Este incremento de ancho se obtiene con las dos paredes ubicadas en cada lado del eje longitudinal medio del dispositivo. El ancho por lo general se incrementa por al menos 30% y de manera más general por al menos 50%. En el caso donde el vidrio se transforma en vidrio plano en una cámara de flotación sobre un metal fundido, por lo general estaño, se recomienda que el vidrio se lleve a una temperatura comprendida entre 1000°C y 1400°C en la salida de la cuenca de acondicionamiento, es decir, por lo general en la salida del extremo de trabajo. Esta temperatura puede depender de la composición del vidrio. El soplado de refrigeración en un extremo de trabajo no debe ser demasiado intenso debido a que podría crear defectos ópticos en la superficie del vidrio. Ésta es la razón por la que, de manera convencional, en la técnica se proporciona un extremo de trabajo grande con el fin de evitar la necesidad de soplar demasiado aire sobre un área pequeña de vidrio y correr el riesgo de crear defectos ópticos en el mismo. Un cuello es más largo que 2 m de longitud y por lo general más largo que 4 m de longitud, en la dirección de flujo general del vidrio, es decir, a lo largo del eje longitudinal medio del dispositivo. Un extremo de trabajo es más largo que 2 m de longitud, y por lo general más largo que 5 m de longitud, en la dirección de flujo general del vidrio, es decir, a lo largo del eje longitudinal medio del dispositivo.

En el contexto de la presente solicitud, la expresión “superficie de vidrio” o “superficie del vidrio” se utiliza para referirse a la superficie superior del vidrio que hace contacto con la atmósfera del horno o del dispositivo de acondicionamiento, dependiendo de las circunstancias. Todos los fenómenos de convección del vidrio fundido en un dispositivo para fabricar vidrio fundido se relacionan con la variación en la temperatura en tal dispositivo desde aguas arriba hasta aguas abajo, es decir, en la zona de fusión, la zona de refinamiento, la cuenca de acondicionamiento, y con la geometría de sus diversos elementos. La zona de fusión es la zona más aguas arriba del horno y comprende al menos el primer quemador aguas arriba del horno. La zona de refinamiento es la zona más aguas abajo del horno, aguas arriba de la cuenca de acondicionamiento. Tal dispositivo es un sistema particularmente complejo y es difícil de modelar. De manera específica, se pretende que combine las siguientes ventajas:

a) vidrio de alta calidad; un vidrio de alta calidad se obtiene al asegurar que el vidrio permanece tanto tiempo como sea posible en una temperatura mayor; de este modo existe una mayor oportunidad de fundir partículas que son difíciles de fundir, y además una temperatura mayor promueve la remoción de burbujas;

b) bajo consumo de energía; se consume energía al calentar el dispositivo pero también al enfriar el vidrio fundido en la cuenca de acondicionamiento, y en particular en el extremo de trabajo, con el fin de llevar el vidrio a una

temperatura apropiada para transformación.

Estos objetivos son difíciles de conciliar debido a que el criterio a) demanda a temperaturas altas e intensidades convectivas altas que hacen que una porción grande del vidrio pase desde aguas abajo hasta aguas arriba en el contraflujo, encontrándose el vidrio aguas abajo ya relativamente frío, mientras que el criterio b) es consistente con proporcionar el menor calor posible y tener la menor necesidad posible para enfriamiento. Aparte de este compromiso de propiedades que se debe encontrar, también se pretende reducir lo más posible el costo de construcción, lo que implica que el área de la pared, el fondo y el techo de los diversos elementos del dispositivo para preparar vidrio, y en particular de la cuenca de acondicionamiento y de manera más particular del extremo de trabajo, sea tan pequeña como sea posible. De manera específica, en la técnica anterior, el extremo de trabajo en ocasiones tiene un tamaño similar al del horno.

La invención se relaciona principalmente con un proceso para preparar vidrio fundido mediante un dispositivo para preparar vidrio fundido que comprende, desde aguas arriba hasta aguas abajo, un horno de fusión y refinamiento, después una cuenca de acondicionamiento. La invención también se relaciona con un dispositivo para preparar vidrio fundido que comprende, desde aguas arriba hasta aguas abajo, un horno de fusión y refinamiento, después una cuenca de acondicionamiento. El horno se equipa con quemadores elevados de fuego transversal, comprendiendo cada quemador una entrada de oxidante y una entrada de combustible. El horno por lo general se equipa con al menos 2 quemadores de fuego transversal en cada pared lateral y por lo general tiene de 3 a 10 quemadores de fuego transversal en cada pared lateral. La potencia de cada quemador de fuego transversal del horno por lo general oscila de 2 a 12 megavatios. Las paredes laterales, las cuales por lo general son paralelas entre sí, por lo general se separan entre sí por una distancia de 7 a 16 metros.

El oxidante puede ser rico en oxígeno, incluso puede ser oxígeno puro (oxidante que contiene de 80 a 100 % en volumen de O_2) o puede basarse en aire (oxidante que contiene de 10 a 30% en volumen de O_2) o incluso puede ser aire o aire rico en oxígeno o aire pobre en oxígeno y especialmente aire diluido con gases de escape de combustión. Los quemadores de fuego transversal se insertan en las paredes laterales (también denominadas “muros laterales”) del horno de fusión/refinamiento. En el caso donde el oxidante se basa en aire (oxidante que comprende 10 a 30 % en volumen de O_2), se colocan pares de quemadores en las paredes laterales del horno que se orientan unos hacia otros y operan en modo inverso como se conoce en la técnica.

En el caso donde el oxidante que suministra a los quemadores de fuego transversal es oxígeno puro, los quemadores se colocan ya sea cara a cara o escalonados. En este caso, por lo general no se proporciona un regenerador para calentar el oxígeno puro antes de que se inyecte en el horno.

Las materias primas vitrificables se introducen aguas arriba en el horno de fusión con el fin de que pasen bajo las llamas de los quemadores de fuego transversal.

Con el fin de determinar las dimensiones adecuadas para el proceso y el dispositivo de acuerdo con la invención, se ha llevado a cabo un trabajo sustancial de modelado de los fenómenos de convección y de transferencias térmicas.

De este modo, la invención se relaciona principalmente con un proceso para fabricar vidrio fundido mediante un dispositivo para fabricar vidrio fundido que comprende desde aguas arriba hasta aguas abajo un horno para fundir y refinar vidrio equipado con quemadores elevados de fuego transversal, y una cuenca de acondicionamiento a la que suministra directamente el horno. La cuenca de acondicionamiento conduce el vidrio a un canal de suministro de un dispositivo de formación. Las dimensiones del dispositivo de fabricación son tales que K es mayor que 3.5, donde

$$K = K_a + \sum_i K_{S_i} \qquad (1)$$

en la que

$$K = 0.000727 \times S_f \times \int_{x_0}^{x_1} \frac{[P(x)]^2}{[\sigma(x)]^3} dx \qquad (2)$$

en la que

S_f representa el área bajo la llama en el horno de fusión/refinamiento;

x_0 es la abscisa en la dirección de flujo general del vidrio del extremo del área bajo la llama en el horno;

x_1 es la abscisa en la dirección de flujo general del vidrio del extremo de la cuenca de acondicionamiento;

σ(x) representa el área de la sección de paso del vidrio del dispositivo en la abscisa x;

P(x) representa el perímetro de la sección de paso del vidrio del dispositivo en la abscisa x; y

$\sum_i K_{Si}$ representa la suma de K_{Si} debidos a un elemento singular en el dispositivo aguas abajo del área bajo la llama en el horno, un elemento singular que produce, desde aguas arriba hasta aguas abajo y a través de menos de 2 m en la dirección de flujo del vidrio, una disminución en la sección de paso del vidrio de más de 10%, después un incremento en la sección de paso del vidrio de más de 10%, donde

$$K_{S_i} = 0.0012 \times \left(\exp\left[5.16 \left(\frac{\sigma_i - \sigma_{S_i}}{\sigma_i} \right)^{2.55} \right] - 1 \right) \left(\frac{S_f}{\sigma_i} \right)^2 \qquad (3)$$

representando σ_i el área de la sección de paso del vidrio justo aguas arriba del elemento singular S_i, y

representando σ_{Si} el área de la sección de paso mínima producido por el elemento singular S_i.

La invención también se relaciona con el dispositivo de la reivindicación 16.

En todas las fórmulas, las unidades utilizadas son unidades las del sistema internacional. Las secciones de paso del vidrio se miden en planos ortogonales a la dirección de flujo general del vidrio.

De preferencia, K es mayor que 5.5 e incluso de más preferencia mayor que 7.5 e incluso de más preferencia mayor que 9, o incluso mayor que 10.5, o incluso mayor que 13. Generalmente, K es menor que 30.

Un valor K alto refleja un bucle de recirculación aguas arriba más intenso en el horno de fusión/refinamiento y un bucle aguas abajo menos intenso en la cuenca de acondicionamiento.

Un elemento singular sobresale en el flujo de vidrio, al igual que, por ejemplo, un escalón colocado en el fondo o una barrera sumergida en el vidrio. Este elemento singular produce una sección de paso mínima para el vidrio.

Los valores de la abscisa incrementan en la dirección desde aguas arriba hasta aguas abajo.

Los elementos singulares también se tienen en cuenta en la fórmula (2) debido a que provocan que la altura o ancho del paso para el vidrio varíe, y por lo tanto que la sección de paso del vidrio y el perímetro de la sección de paso varíen. Generalmente, todas las secciones de paso de vidrio en el dispositivo o proceso de acuerdo con la invención tienen una forma rectangular o cuadrada, incluyendo al nivel de un elemento singular. De manera específica, un elemento singular sobresale en el vidrio desde el fondo o desde una o ambas paredes laterales, o desde la parte superior, y eso en la totalidad del o de los lados del cuadrado o rectángulo que forma la sección de paso del vidrio y desde el cual sobresale el elemento singular. Sin embargo, no se excluye que la sección de paso pueda ser una forma más compleja.

El área bajo la llama S_f en el horno de fusión/refinamiento es una noción bien conocida en la técnica. Es igual al área de vidrio continua bajo el cuadrilátero más pequeño que cubre los límites exteriores de las entradas de oxidante de los quemadores elevados de fuego transversal o de fuego no transversal en extremos en el horno de fusión/refinamiento, siendo el lado aguas arriba de este cuadrilátero paralelo a la pared aguas arriba del horno y formando un segmento que se extiende desde una pared lateral a la otra pared lateral, siendo el lado aguas abajo de ese cuadrilátero también paralelo a la pared aguas arriba del horno y formando un segmento que se extiende desde una pared lateral a la otra pared lateral. La abscisa x_0 de la fórmula (2) corresponde con el lado aguas abajo del cuadrilátero del área bajo la llama. Este cuadrilátero por lo general tiene dos de sus lados superpuestos en las paredes laterales del horno. Generalmente, las paredes laterales del horno son paralelas y ortogonales a la pared aguas arriba, y este cuadrilátero es en este caso un cuadrado o un rectángulo. El horno puede comprender sólo quemadores elevados de fuego transversal. Sin embargo, además de los quemadores elevados de fuego transversal, el horno puede comprender al menos un quemador de oxígeno, en particular en el techo o transversal. Éste también es un quemador elevado debido a que su llama se crea en la atmósfera del horno. Tal quemador de oxígeno puede incrementar el área bajo la llama que se tendrá en cuenta en las fórmulas (2) y (3) si se ubica fuera del área bajo la llama de las entradas de oxidante de los quemadores elevados de fuego transversal. S_f es el área de vidrio bajo el cuadrilátero más pequeño como se define en lo anterior que cubre los límites exteriores de las entradas de oxidante de todos los quemadores elevados, incluyendo aquellos de los quemadores de oxígeno.

La presencia de un elemento singular, tal como un escalón o barrera, primero provoca que la sección de paso disminuya y después incremente en la dirección de flujo del vidrio, esta disminución e incremento ocurre a través de una distancia menor que 2 metros en la dirección de flujo general del vidrio (es decir, a lo largo del eje longitudinal medio del dispositivo). Un elemento singular puede, por ejemplo, consistir de un escalón fijo en el fondo del horno. También puede ser una cuestión de una barrera metálica refrigerada por agua, soportada por la superestructura e

introducida desde el lado, sumergiéndose dicha barrera en el vidrio con el fin de disminuir la sección de paso del vidrio. Cuando el vidrio se encuentra con el escalón o la barrera, la sección del vidrio disminuye sustancialmente. Una vez que el vidrio ha pasado el escalón o la barrera, la sección del vidrio incrementa. Debido al elemento singular, la sección de paso de vidrio por lo tanto primero disminuye e incrementa de manera subsiguiente, desde aguas arriba hasta aguas abajo. El elemento singular también puede proceder de particiones o una compuerta dispuesta en las paredes laterales del dispositivo.

Un K_{si} corresponde con un elemento singular. Para determinar si un elemento singular se encuentra presente, conviene medir la variación de sección aguas arriba y la variación de sección aguas abajo, producidas de manera sucesiva por dicho elemento singular. La variación de sección aguas arriba se aprecia al medir la diferencia en sección entre la sección justo aguas arriba del elemento singular (denominada la sección aguas arriba del elemento singular) y la sección mínima σ_{Si} debida al elemento singular, en relación con la sección justo aguas arriba del elemento singular. La variación de sección aguas abajo se aprecia al medir la diferencia en sección entre la sección justo aguas abajo del elemento singular (denominada la sección aguas abajo del elemento singular) y la sección mínima σ_{Si} debida al elemento singular, en relación con la sección mínima debida al elemento singular. Si estas dos variaciones son mayores que 10%, está presente un elemento singular cuyo K_{Si} debe calcularse e ingresarse en el cálculo de K del dispositivo.

Un elemento singular comienza, en la dirección de flujo del vidrio, en el punto donde dicho elemento comienza a disminuir la sección de paso del vidrio mediante una pared que forma un ángulo con la dirección de flujo general del vidrio mayor que 40° (ángulo dentro del elemento singular). Generalmente, este ángulo es de 90°. Un elemento singular termina, en la dirección de flujo del vidrio, en el punto donde termina de aumentar la sección de paso del vidrio mediante una pared que forma un ángulo mayor que 40° (ángulo dentro del elemento singular) con la dirección de flujo general del vidrio. Generalmente, este ángulo es de 90°. La distancia entre el inicio del elemento singular y el final del elemento singular es menor que 2 metros a lo largo del eje longitudinal medio del dispositivo para que pueda considerarse que está presente un elemento singular.

La influencia de las dimensiones del dispositivo se aprecia en términos de calidad Q, del consumo y de la posibilidad de utilizar una cuenca de acondicionamiento pequeña y en particular un extremo de trabajo pequeño. El factor K, tal como se describe en lo anterior, tiene en cuenta parámetros esenciales que permiten dimensionar un dispositivo o proceso de acuerdo con la invención de bajo consumo de energía mientras que se conserva una excelente calidad del vidrio. El factor K ayuda a determinar dispositivos en los que es posible utilizar una cuenca de acondicionamiento pequeña. De acuerdo con la invención, K es mayor que 3.5, de preferencia mayor que 5.5 e incluso de más preferencia mayor que 7.5.

Los flujos de vidrio en un dispositivo para fabricar vidrio fundido se han modelado numéricamente utilizando un paquete de software de hidrodinámica disponible comercialmente. Dependiendo en la geometría del dispositivo, el paquete de software calcula el flujo de energía que debe imponerse a la superficie libre del vidrio para asegurar que la temperatura de superficie máxima del vidrio sea igual a 1590°C en el horno de fusión/refinamiento, y que la temperatura del vidrio en la salida del extremo de trabajo sea igual a 1130°C. El vidrio considerado es un vidrio de sosa y cal estándar con un contenido de Fe_2O_3 en peso de 700 ppm y un contenido de FeO en peso de 180 ppm. Las pérdidas térmicas del depósito y el fondo fueron estándar (4 kW/m^2). Los ensayos llevados a cabo en dispositivos de fusión reales confirmaron la relevancia del factor K de acuerdo con la invención.

La calidad Q se determinó de la siguiente manera. Aquellos con experiencia en la técnica conocen que la calidad de un vidrio fundido se mejora al dejarlo en altas temperaturas, y de manera más precisa a temperaturas mayores que la temperatura en la que tiene lugar el refinamiento químico del vidrio, durante más tiempo. Con base en los flujos calculados utilizando el modelo numérico, se realizó un seguimiento de 100,000 partículas desde la pared aguas arriba del horno. El criterio de calidad Q considerado es el tiempo promedio de permanencia por encima de 1400°C, en relación con un caso de referencia.

El consumo se determinó de la siguiente manera: se trata de la cantidad de energía que entra en el vidrio a nivel de su superficie libre en el horno de fusión/refinamiento para que la temperatura de superficie máxima del vidrio se igual a 1590°C en el horno de fusión/refinamiento y que la temperatura del vidrio en la salida de la cuenca de acondicionamiento sea igual a 1130°C, además de la energía para fundir la materia prima hasta su transformación en fase líquida, y esto en términos relativos en relación con un caso de referencia (ejemplo No. 1 en la Tabla 1). La posibilidad de utilizar una cuenca de acondicionamiento pequeña y en particular un extremo de trabajo pequeño se determinó considerando la influencia del tamaño de la cuenca de acondicionamiento en la calidad Q y el consumo, pero también en la energía de soplado necesaria para el enfriamiento. Resulta muy ventajoso tener la capacidad de emplear un extremo de trabajo pequeño debido a que un extremo de trabajo pequeño requiere menos material para construirse y por lo tanto es menos costoso. Además, el área de contacto de material de construcción con el vidrio es más pequeña en el caso de una cuenca de acondicionamiento pequeña, por lo tanto disminuye el riesgo de que se crean defectos en el vidrio.

De acuerdo con la invención, se ha descubierto que el tamaño de la cuenca de acondicionamiento, y en particular de un extremo de trabajo, puede disminuirse enormemente en particular debido a la intensidad relativa baja de la celda de convección aguas abajo lo que equivale a tener menos vidrio para acondicionar, y lo que se traduce en un valor K

apropiado.

De acuerdo con la invención, el fondo del compartimento de refinamiento y el fondo de la cuenca de acondicionamiento son suficientemente profundos para que un mismo bucle de recirculación (denominado bucle aguas abajo) pase a través de estos dos elementos. Este bucle pasa a través de todos los compartimentos de la cuenca de acondicionamiento, en particular por lo general a través de un cuello seguido por un extremo de trabajo. De preferencia, este bucle aguas abajo se extiende hasta el extremo de la cuenca de acondicionamiento, por lo general un extremo de trabajo, es decir, hasta el canal, sin entrar al canal. La existencia de este bucle de recirculación es esencial sin dejar de ser de intensidad moderada. De manera específica, se ha observado que el contraflujo de este bucle contiene la mayoría de los defectos que se originan de la zona de refinamiento, además de aquellos generados en la cuenca de acondicionamiento, y que regresarlos a la zona de refinamiento del horno por lo general provoca que desaparezcan. Se acepta por aquellos con experiencia en la técnica que una cuenca de acondicionamiento grande, y en particular un extremo de trabajo grande es necesario con el fin de proporcionar al vidrio el tiempo para que repose lo suficiente para que las burbujas tengan tiempo de escapar, y con el fin de permitir que el vidrio se enfríe a la temperatura requerida para su transformación. En cambio, se ha descubierto que es mejor tener una cuenca de acondicionamiento pequeña, y en particular un extremo de trabajo pequeño, que se someta posiblemente a un enfriamiento un poco más intenso, debido a que el área de material que hace contacto con el vidrio se minimiza de este modo y es el origen de menos defectos. El tamaño pequeño de la cuenca de acondicionamiento también se hace posible gracias a la baja intensidad del bucle de recirculación que pasa a través de ella. De manera específica, esta baja intensidad significa que la celda de recirculación transfiere menos calor desde el horno hasta la cuenca de acondicionamiento, la cual necesita por tanto un enfriamiento más moderado. De preferencia, el bucle de recirculación que pasa a través de la cuenca de acondicionamiento se extiende hasta el canal pero no pasa en el canal. De acuerdo con esta posibilidad, el bucle de recirculación aguas abajo se extiende hasta la abscisa x_1, la cual puede corresponder con el extremo aguas abajo de un extremo de trabajo. Eso significa que en cualquier plano vertical transversal al eje longitudinal del horno en la cuenca de acondicionamiento existen puntos en el vidrio que tienen un componente de velocidad longitudinal negativa, es decir, que apunta desde aguas abajo hasta aguas arriba. Tales puntos forman parte de un contraflujo. Una velocidad se considera positiva si se dirige en la dirección de flujo del vidrio, desde aguas arriba hasta aguas abajo. De manera específica, pueden formarse burbujas a través de toda la cuenca de acondicionamiento, hasta su extremo, como resultado del contacto entre el vidrio y los materiales de dicha cuenca. Por lo tanto existe una competencia entre la velocidad de ascenso de las burbujas y su arrastre por el vidrio, especialmente hacia aguas arriba. Es posible evaluar el porcentaje de burbujas residuales que entran al canal mediante un cálculo de modelado conocido por aquellos con experiencia en la técnica en el que 100,000 burbujas se colocan aleatoriamente en el fondo de la cuenca de acondicionamiento y se mueven bajo el efecto de convección del vidrio y de su tendencia a elevarse bajo el efecto del principio de Arquímedes.

El paso desde la cuenca de acondicionamiento hasta el canal se realiza por una disminución brusca en el ancho de paso del vidrio y por una disminución en la profundidad de vidrio. Esa disminución puede lograrse especialmente por paredes colocadas ortogonales al eje del dispositivo.

De preferencia, el material utilizado para la cuenca de acondicionamiento, en particular para un extremo de trabajo y de manera opcional para un cuello, es un material para hacer contacto con el vidrio fundido y que no genera defectos en el vidrio. Lo mismo ocurre para el canal que lleva vidrio desde la cuenca de acondicionamiento al dispositivo de transformación. En este canal, el flujo del vidrio es un flujo de pistón sin celda de recirculación. Sin embargo, un material de este tipo, tal como alúmina pura, vendida especialmente bajo el nombre comercial de Jargal, es extremadamente costoso y, por un lado, se utiliza escasamente y, por otro lado, en las zonas de flujo más aguas abajo antes de que el dispositivo para transformar el vidrio.

El horno de fusión/refinamiento puede comprender un compartimento de fusión y un compartimiento de refinamiento de diferentes profundidades de fondo respectivas. El compartimiento de fusión está situado aguas arriba del compartimento de refinamiento (con referencia a la dirección de flujo del vidrio) y por lo general ocupa un área de fondo mayor que la del compartimento de refinamiento y puede ser más profundo que el fondo del compartimento de refinamiento. El fondo del compartimiento de fusión por lo general es esencialmente plano. El fondo del compartimiento de refinamiento por lo general también es esencialmente plano. El paso desde el fondo de la zona de fusión hasta el fondo de la zona de refinamiento puede ser abrupto, es decir, consiste de un escalón vertical. Sin embargo, puede ser un paso más gradual, del tipo de pendiente inclinada o una sucesión de escalones, que puede realizarse a lo largo de una distancia por lo general a lo sumo de 1 m. El horno de fusión/refinamiento por lo general comprende cuatro paredes: una pared aguas arriba, una pared aguas abajo y dos paredes laterales. Por lo general, las dos paredes laterales son paralelas y permanecen separadas entre sí por la misma distancia a través de la longitud total del horno. La diferencia en profundidad y por lo tanto en altura de vidrio entre los fondos de las dos zonas del horno puede provocar que se forme una celda de reticulación muy intensa en la zona de fusión (zona aguas arriba del horno). De este modo el fondo de la zona de fusión es suficientemente profundo para que la intensidad conectiva de la celda de reticulación aguas arriba, en la zona de fusión, de preferencia se comprenda entre 3 y 5 veces la demanda del horno. El bucle de recirculación aguas abajo es de mucho menos intensidad. Debe observarse que la transparencia del vidrio puede influir en la intensidad conectiva, dando un vidrio más transparente por lo general lugar a una intensidad conectiva más alta. La intensidad conectiva de un bucle de recirculación es igual a la proporción de la tasa de flujo de vidrio que circula desde aguas arriba a aguas abajo en este bucle (tasa de

flujo hacia delante) a la demanda del dispositivo y por lo tanto del proceso.

La proporción de la altura de vidrio en la zona de fusión a la altura de vidrio en la zona de refinamiento puede comprenderse especialmente entre 1.2 y 2. Algunas obstrucciones (escalones de altura más pequeña que 50 cm) puede colocarse en el fondo de la zona de fusión y en el fondo de la zona de refinamiento. Por lo general, la proporción entre la longitud y el ancho del horno de fusión/refinamiento se comprende en el margen que se extiende de 2 a 4.

El dispositivo utilizado para transformar el vidrio, que sigue al dispositivo o proceso de acuerdo con la invención, puede ser un dispositivo para transformar en vidrio hueco, o para transformar en fibra, pero de manera más general es un dispositivo para transformar en vidrio plano, del tipo en el que el vidrio se hace flotar en un baño de metal fundido tal como estaño, o del tipo de laminación. A ese dispositivo de transformación le suministra un canal al que a su vez le suministra la cuenca de acondicionamiento. El flujo de vidrio en el canal es un flujo de pistón.

La invención hace posible producir y utilizar un dispositivo de fusión que comprende un horno de fusión/refinamiento y una cuenca de acondicionamiento de modo que la proporción del área bajo la llama del horno al área de la cuenca de acondicionamiento es mayor que 1.4 e incluso mayor de 1.6 e incluso mayor que 1.8. De preferencia, la proporción del área bajo la llama del horno al área de la cuenca de acondicionamiento (S_f/S_{cond}) es menor que 4 e incluso de más preferencia menor que 3.

El dispositivo y el proceso de acuerdo con la invención pueden utilizarse para fundir cualquier tipo de vidrio, sin importar si es tintado o no, especialmente vidrio de sosa y cal, aluminosilicatos, borosilicatos, entre otros.

La presente invención se relaciona con cualquier proceso y dispositivo que comprende o utiliza un horno de vidrio que comprende quemadores de fuego transversal, especialmente para fundir vidrio con vistas a formarlo en vidrio plano en una unidad de flotación. La invención se relaciona de manera más particular con procesos y dispositivos cuyo horno de fusión/refinamiento tiene una capacidad de 500 a 1500 m^3 de vidrio y de manera más particular de 700 a 1400 m^3 de vidrio. La invención se relaciona de manera más particular con procesos y dispositivos cuya demanda es de 400 a 1300 toneladas de vidrio por día. La invención se relaciona de manera más particular con procesos y dispositivos cuyo horno presenta una altura de vidrio comprendida en el margen que se extiende de 0.8 a 2 metros (zona de fusión y zona de refinamiento), pudiendo esta altura variar de aguas arriba a aguas abajo, y una cuenca de acondicionamiento cuya altura de vidrio se comprende en el margen que se extiende de 0.4 a 1.40 metros, pudiendo esta altura variar de aguas arriba a aguas abajo.

La invención se relaciona en particular con un proceso para preparar vidrio utilizando el dispositivo de acuerdo con la invención. La invención se relaciona de manera más particular con dispositivos y procesos cuya temperatura de superficie máxima del vidrio en el horno se comprende entre 1350 y 1650°C y la temperatura del vidrio que sale de la cuenca de acondicionamiento se comprende entre 1000 y 1400°C.

Las figuras descritas a continuación no son a escala.

La Fig. 1 muestra un dispositivo de acuerdo con la invención, en a) como se ve desde arriba y en b) como se ve desde el lado. Comprende, de aguas arriba a aguas abajo, un horno 1, que comprende una zona para introducir materia prima 20, una zona 2 de fusión, una zona 3 de refinamiento y una cuenca de acondicionamiento que comprende un cuello 4 y un extremo 5 de trabajo. El extremo de trabajo suministra vidrio fundido a una temperatura apropiada a la unidad de transformación mediante el canal 6 dentro del cual el flujo del vidrio es un flujo de pistón. El horno 1 de fusión/refinamiento se equipa con quemadores elevados de fuego transversal, 6 entradas de aire de los cuales se muestran con la referencia 7. Las dos paredes 11 y 12 laterales están equipadas simétricamente con quemadores de fuego transversal enfrentados, esos quemadores se operan alternativamente, “en modo inverso”, como se conoce la técnica. Los límites exteriores de las cuatro entradas (8, 9) de aire exteriores forman las esquinas del cuadrilátero 10, sombreado en la a), y representan, como se ve desde arriba, el área bajo la llama o S_f. La letra x_0 indica la abscisa del extremo del área bajo la llama en el horno (lado aguas abajo del cuadrilátero que representa el área bajo la llama) y la letra x_1 indica la abscisa del extremo de la cuenca de acondicionamiento, en el eje AA’ longitudinal medio del dispositivo (A que es aguas arriba y A’ que es aguas abajo) que corresponde con la dirección de flujo general del vidrio. Bajo el nivel de la superficie del vidrio 13 fundido giran dos celdas 14 y 15 de convección. La primera 14, denominada el bucle de recirculación aguas arriba, es relativamente intensa en el compartimiento de fusión y pasa especialmente bajo el primer quemador 9 aguas arriba. La segunda 15, denominada el bucle de recirculación aguas abajo, es menos intensa y pasa a través de la zona de refinamiento del horno, después a través del cuello y el extremo del trabajo, pero no pasa en el canal 6. Una obstrucción 16 refuerza aquí el límite entre, y la formación de, las dos celdas 14 y 15 de convección. El paso desde el horno al cuello se realiza por una disminución brusca en el ancho y en la sección de paso del vidrio, aquí mediante las paredes 19 y 19’ que forman un ángulo de 90° con la dirección de flujo media del vidrio. El paso desde el cuello hasta el extremo de trabajo se realiza por un incremento brusco del ancho en la sección de paso de vidrio aquí mediante las paredes 18 y 18’ que forman un ángulo de 90° con la dirección de flujo media del vidrio. Una barrera 17 sumergible en el inicio del cuello disminuye la sección de paso de vidrio y forma un elemento singular cuyo K_{Si} conviene calcular. La superficie del vidrio 60 en el extremo de trabajo, es decir, la superficie que hace contacto con la atmósfera en el extremo de trabajo, se somete al aire soplado en este último con el fin de enfriar el vidrio. Este aire pasa desde el extremo de trabajo al dispositivo de

acondicionamiento pero entra lo menos posible en el horno de fusión/refinamiento.

La Fig. 2 muestra una vista desde arriba del paso desde la zona 21 de refinamiento de un horno a la cuenca de acondicionamiento, que se compone de un cuello 22, después de un extremo 23 de trabajo. Las flechas en el eje AA' longitudinal medio simbolizan el flujo del vidrio desde aguas arriba a aguas abajo. El dispositivo es simétrico a ambos lados del eje AA'. En el paso desde el horno al cuello, el ancho del paso del vidrio se disminuye bruscamente por las paredes 24 y 24' del horno que forman un ángulo α con la dirección de flujo del vidrio de al menos 40° a ambos lados del eje AA' del dispositivo. En el paso del cuello al extremo de trabajo, el ancho del paso de vidrio se incrementa netamente por medio de las paredes 25 y 25' que forman un ángulo β de más de 40° con la dirección del flujo del vidrio. Este incremento del ancho se produce a ambos lados del eje longitudinal medio del dispositivo.

La Fig. 3 muestra un escalón 30 que disminuye claramente la sección de paso del vidrio, cuya superficie se representa con el número 31 y cuya dirección de flujo se muestra por flechas, pudiendo encontrarse dicho escalón en una cuenca de acondicionamiento y en particular en un cuello o en un extremo de trabajo. Se trata de un elemento singular cuyo K_S conviene calcular. El elemento singular comienza en el punto 32 (es un punto en la figura pero de hecho es una línea perpendicular a la dirección general de flujo del vidrio) en donde una pared 33 que forma un ángulo δ mayor de 40° con la dirección de flujo general del vidrio comienza a disminuir la sección de paso del vidrio. El elemento singular termina en el punto 34 en la ubicación donde una pared 35 que forma un ángulo γ mayor que 40° con la dirección de flujo general del vidrio termina de incrementar la sección de paso del vidrio. La distancia entre el punto 32 y el punto 34 es menor que 2 m paralela a la dirección de flujo general del vidrio mostrada por las flechas horizontales. Este escalón es el origen de una sección 36 de paso mínima de vidrio.

La Fig. 4 muestra una barrera 40 sumergida en el vidrio, cuya superficie se representa con el número 41, y cuya dirección de flujo se muestra por flechas, pudiendo dicha barrera ubicarse en una cuenca de acondicionamiento en particular en un cuello o en un extremo de trabajo. Se trata de un elemento singular cuyo K_{Si} conviene calcular. El elemento singular comienza en el punto 42 en donde una pared 43 que forma un ángulo ϕ mayor que 40° con la dirección de flujo general del vidrio, comienza a disminuir la sección de paso del vidrio. El elemento singular termina en el punto 44 en el lugar donde una pared 45 que forma un ángulo ψ mayor que 40° con la dirección de flujo general del vidrio termina de aumentar la sección de paso del vidrio. La distancia entre el punto 42 y el punto 44 es menor que 2 m paralela a la dirección de flujo general del vidrio mostrada por las flechas horizontales. Esta barrera es el origen de una sección 46 de paso mínima de vidrio.

La Fig. 5a) muestra un plano en sección transversal del dispositivo ortogonal a la dirección de flujo del vidrio en una abscisa x. Puede tratarse especialmente de una sección transversal en el cuello o en el extremo de trabajo. El vidrio 50 fluye de manera ortogonal al plano de la figura. El vidrio se contiene por el fondo 51 y los bloques 52 y 52' de depósito, formando el fondo y los bloques de depósito parte de la infraestructura del dispositivo. Una barrera 53 se sumerge en el vidrio sólo por una parte de la distancia entre los bloques de depósito, en el plano de la sección de paso del vidrio. El sistema que mantiene la barrera no se muestra, ni el techo que cubre el interior del dispositivo. El nivel 55 de vidrio que hace contacto con la atmósfera interna se ubica por debajo del nivel 56 superior de los bloques de depósito por una distancia 57 denominada un margen de seguridad. Los elementos 54 y 54' se apoyan sobre los bloques de depósito y forman parte de la superestructura. La Fig. 5b) explica lo que se entiende por las expresiones "área de la sección de paso de flujo del vidrio en la abscisa x" y "perímetro de la sección de paso del vidrio del dispositivo en la abscisa x", como se aplican en el caso en la Fig. 5a). El área de la sección de paso de vidrio es el área de la zona sombreada en la Fig. 5b). El perímetro de la sección de paso de vidrio es la suma de la longitud de los segmentos AB, BC, CD, DE, EF, FG, GH y HA.

EJEMPLOS 1 a 19

Todos los ejemplos se llevan a cabo en un dispositivo tal como se muestra en la Fig. 1 y que comprende un horno de fusión/refinamiento seguido por una cuenca de acondicionamiento compuesta de un cuello seguido de un extremo de trabajo. Las tablas 1 y 2 proporcionan las dimensiones de los diversos elementos de dispositivo y los resultados. Todos los hornos de los ejemplos tuvieron un área bajo la llama S_f de 326.3 m^2. Se pretendió que todos los ejemplos proporcionaran una demanda de 900 toneladas por día de vidrio fundido, a la temperatura de superficie máxima de vidrio de 1590°C en el horno y a la temperatura en la salida del extremo de trabajo de 1130°C. El vidrio fue vidrio de sosa y cal estándar con un contenido en peso de 700 ppm de Fe_2O_3 y 180 ppm de FeO. En todos los ejemplos, con excepción de los ejemplos5, 8 y 19, una barrera de 50 mm de espesor mantenida por la superestructura del cuello y sumergida en el vidrio una profundidad de 400 mm se colocó en el cuello de manera que la cara aguas arriba de esta barra se ubicara a 3.2 metros desde la entrada del cuello. En el caso del ejemplo 5, no hubo barrera alguna (K_s=0). En el ejemplo 8, la barrera se sumergió en el vidrio a una profundidad de 350 mm. En el ejemplo 19, la barrera se sumergió en el vidrio a una profundidad de 500 mm. En su caso, la barrera fue el único elemento singular para que el que fue necesario calcular un K_{Si}.

Para todos los ejemplos:

- la longitud de la zona de fusión fue de 26675 mm;

- el ancho de las zonas de fusión y refinamiento fue de 13000 mm;

- la longitud de la zona de refinamiento fue de 17000 mm;

- la distancia entre el extremo del área bajo la llama y la entrada del cuello fue de 14075 mm;

- h_f representa la altura de vidrio en la zona de fusión;

- h_a representa la altura de vidrio en la zona de refinamiento;

- V_{fa} representa el volumen de vidrio en el horno;

- L_c representa la longitud del cuello;

- l_c representa el ancho del cuello;

- h_c representa la altura de vidrio en el cuello;

- L_b representa la longitud del extremo de trabajo;

- l_b representa el ancho del extremo de trabajo;

- h_b representa la altura de vidrio en el extremo de trabajo;

- ΔQ representa la calidad del vidrio en relación con la calidad del vidrio del ejemplo 1 (caso de referencia) es decir la diferencia entre la calidad del vidrio del ejemplo i en cuestión y la calidad del vidrio del Ejemplo 1, la suma se divide entre la calidad del ejemplo 1 $\Delta Q=(Q_i-Q_1)/Q_1$; es el tiempo promedio de permanencia por encima de 1400°C el que se considera. Esta ΔQ se multiplica por 100 en la tabla 1 con el fin de expresar resultado en porcentaje.

- ΔConso representa el consumo de energía de todo el dispositivo en relación con el consumo del ejemplo 1, es decir, la diferencia entre el consumo del ejemplo i en cuestión y el consumo del ejemplo 1, la suma se divide entre el consumo del ejemplo 1: $\Delta Conso=(Conso_i-Conso_1)/Conso_1$; este ΔConso se multiplica por 100 en la Tabla 1 con el fin de expresar el resultado en porcentaje.

- ΔSouff representa la intensidad de soplado de refrigeración del extremo de trabajo en relación con la intensidad de soplado de refrigeración del extremo de trabajo del Ejemplo 1, es decir, la diferencia de entre la intensidad de soplado de refrigeración del extremo de trabajo del ejemplo i en cuestión y la intensidad de soplado de refrigeración del extremo de trabajo del Ejemplo 1, la suma se divide entre la intensidad de soplado de refrigeración del extremo de trabajo del Ejemplo 1: $\Delta Souff=(Souff_i-Souff_1)/Souff_1$; este ΔSouff se multiplica por 100 en la Tabla 2 con el fin de expresar el resultado en porcentaje.

No. de Ej.	h_f (m)	h_a (m)	V_{fa} (m^3)	L_c (m)	l_c (m)	h_c (m)	L_b (m)	l_b (m)	h_b (m)	K	ΔQ (%)	ΔConso (%)
1	1.45	1.45	823	7	4.8	1.45	17	12	1.45	2.31	0	0.0
2	1.45	1.45	823	7	4.8	1.45	12.75	9	1.45	2.35	-7	1.8
3	1.45	1.27	783	7	4.8	1.27	12.75	9	1.27	3.63	3	-1.2
4	1.45	1.27	783	7	4.8	1.27	12.75	9	0.89	5.07	11	-3.5
5	1.45	1.27	783	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	5.67	12	-4.1
6	1.45	1.27	783	7	6.5	0.89	12.75	9	0.89	8.50	23	-6.9
7	1.45	1.27	783	7	4.8	1.27	12.75	9	0.6	9.86	28	-8.2
8	1.45	1.27	783	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	10.01	26	-7.4
9	1.45	1.27	783	4.5	4.8	0.89	12.75	9	0.89	11.46	31	-8.6
10	1.45	1.27	783	7	4.8	0.89	12.75	13	0.89	11.65	31	-8.3
11	2	2	1136	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	12.02	28	-7.2
12	1.45	1.45	823	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	12.26	27	-8.5
13	1.45	1.27	783	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	12.45	28	-8.4
14	2	1.27	974	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	12.45	28	-7.5
15	1.27	1.27	721	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	12.45	27	-9.3
16	1.45	0.89	700	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	13.51	32	-8.9
17	1.45	1.27	783	7	4.8	0.89	12.75	4.8	0.89	15.17	36	-9.1
18	1.45	1.27	783	7	3.7	0.89	12.75	9	0.89	18.22	36	-9.7
19	1.45	1.27	783	7	4.8	0.89	12.75	9	0.89	21.76	41	-9.9

Tabla 1

Los valores de K_a y de K_S debidos a la barrera sumergible (donde $K=K_a+K_S$), al igual que las características del área de cuenca de acondicionamiento y las características de soplado se detallan en la Tabla 2, representando σ_{sc} la sección de paso mínima del vidrio producida por la barrera en el cuello de cómo elemento singular, representando S_c el área de vidrio que hace contacto con la atmósfera en el cuello, representando S_b el área de vidrio que hace contacto con la atmosfera en el extremo de trabajo, representando S_{cond} el área del vidrio que hace contacto con la atmosfera en la cuenca de acondicionamiento (donde $S_{cond}=S_c+S_b$), y representando S_f/S_{cond} la proporción del área bajo las llamas al área de vidrio que hace contacto con la atmósfera en la cuenca de acondicionamiento.

No. de Ej.	Ka	σ_{sc} (m²)	K_s	K	S_c (m²)	S_b (m²)	S_{cond} (m²)	S_f /S_{cond}	ΔSouff (%)
1	1.75	5.04	0.56	2.31	33.6	204	237.6	1.37	0
2	1.79	5.04	0.56	2.35	33.6	114.75	148.35	2.20	119
3	2.55	4.176	1.07	3.63	33.6	114.75	148.35	2.20	83
4	4.00	4.176	1.07	5.07	33.6	114.75	148.35	2.20	55
5	5.67	4.272	0	5.67	33.6	114.75	148.35	2.20	46
6	4.84	3.185	3.65	8.50	45.5	114.75	160.25	2.04	14
7	8.78	4.176	1.07	9.86	33.6	114.75	148.35	2.20	7
8	5.73	2.592	4.29	10.01	33.6	114.75	148.35	2.20	11
9	4.77	2.352	6.70	11.46	21.6	114.75	136.35	2.39	17
10	4.96	2.352	6.70	11.65	33.6	165.75	199.35	1.64	-38
11	5.32	2.352	6.70	12.02	33.6	114.75	148.35	2.20	0
12	5.56	2.352	6.70	12.26	33.6	114.75	148.35	2.20	-6
13	5.75	2.352	6.70	12.45	33.6	114.75	148.35	2.20	2
14	5.75	2.352	6.70	12.45	33.6	114.75	148.35	2.20	2
15	5.75	2.352	6.70	12.45	33.6	114.75	148.35	2.20	-3
16	6.81	2.352	6.70	13.51	33.6	114.75	148.35	2.20	-2
17	8.47	2.352	6.70	15.17	33.6	61.2	94.8	3.44	89
18	6.94	1.813	11.27	18.22	25.9	114.75	140.65	2.32	-6
19	5.84	1.872	15.92	21.76	33.6	114.75	148.35	2.20	-15

Tabla 2

Los ejemplos se numeran de 1 a 19 según el incremento del factor K. Se observa que existe una correlación con la calidad de ΔQ obtenida para el vidrio, llevando los ejemplos 3 a 19 a una calidad de vidrio mejor. Como puede verse, es recomendable que K sea mayor de 3.5 y de preferencia mayor de 5.5 e incluso de preferencia mayor que 7.5. Los consumos de energía de los ejemplos 3 a 19 también son buenos. Los extremos de trabajo pequeños de 114.75 m2 por lo general son suficientes, con excepción del Ejemplo 2 que necesita una intensidad de soplado demasiado alta. Para la intensidad del soplado utilizada en el Ejemplo 1, el riesgo de que parezcan defectos ópticos en la superficie del vidrio es bajo. En cambio, este riesgo es real en el caso del Ejemplo 2, debido a que un área de cuenca de acondicionamiento de 148.35 m^2 requiere un ΔSouff mayor que el 119% del Ejemplo 1. Se observará que si ΔSouff

es mayor que el 90% del Ejemplo 1, entonces el riesgo de que aparezcan defectos ópticos en la superficie es demasiado alto, lo que es el caso para el Ejemplo 2. De preferencia, ΔSouff es menor que el 85% del Ejemplo 1. Con el fin de lograr esto, conviene que K sea suficientemente alto de acuerdo con la presente invención, y que la proporción del área bajo la llama al área de la cuenca de acondicionamiento (S_f/S_{cond}) sea menor que 4 y de preferencia menor que 3, e incluso de más preferencia menor que 2.5. En el caso del Ejemplo 10, el área de la cuenca de acondicionamiento es muy grande y por lo tanto su producción es costosa, explicando esta área alta la intensidad de soplado reducida. En esta configuración, el área de la cuenca de acondicionamiento podría disminuirse.

En todos los ejemplos, la temperatura de fondo fue menor de 1360°C.

En todos los ejemplos con la excepción del ejemplo 7, el vidrio contuvo burbujas residuales en una cantidad menor del 50%. El ejemplo 7 corresponde con el Ejemplo 4 con excepción de que la profundidad del extremo de trabajo fue de 600 mm. Debido a la profundidad pequeña del extremo de trabajo, la celda de recirculación que pasa a través de la cuenca de acondicionamiento pasa a través del cuello y a través de una buena parte de extremo de trabajo pero no llega hasta la entrada del canal. En los últimos 7 metros del extremo de trabajo, el flujo del vidrio fue un flujo de pistón. En la entrada del canal, el vidrio contuvo burbujas residuales en una cantidad de 60%.

EJEMPLO 20

El dispositivo tiene las mismas dimensiones que el dispositivo del Ejemplo 1, con excepción de que no hay barrera y la profundidad del extremo de trabajo disminuye por 50% (a 0.72 m) y el ancho del extremo de trabajo disminuye a 6 metros. El valor de K es de 10.22. El bucle de recirculación que pasa a través de la cuenca de acondicionamiento pasa a través del cuello y una porción del extremo de trabajo pero no se extiende hasta el canal debido a que no hay recirculación en los últimos 7 metros del extremo de trabajo, siendo entonces el flujo un flujo de pistón. En la entrada de canal, el vidrio contiene 50.4% de burbujas residuales. Los demás resultados son los siguientes. ΔSouff = 24%, Sf/Scond=2.41 y ΔQ = -8.

REIVINDICACIONES

1. Un proceso para fabricar vidrio fundido en un dispositivo que comprende de aguas arriba a aguas abajo un horno (1) para fundir y refinar vidrio equipado con quemadores (7) elevados de fuego transversal, después una cuenca de acondicionamiento que comprende uno o más compartimentos (4, 5), comprendiendo dicho horno una zona (2) de fusión y una zona (3) de refinamiento, siendo el fondo de la zona de refinamiento y el fondo de la cuenca de acondicionamiento suficientemente profundos para que un mismo bucle (15) de recirculación, denominado bucle aguas abajo, pase a través de la zona de refinamiento y a través de todos los compartimentos (4, 5) de la cuenca de acondicionamiento, suministrándose a dicha cuenca de acondicionamiento vidrio por el horno, comprendiendo dicho proceso fundir vidrio en el horno de fusión y refinamiento, siendo las dimensiones del dispositivo tales que K es mayor de 3.5, donde

$$K = K_a + \sum_i K_{S_i}$$

en la cual

$$K_a = 0.000727 \times S_f \times \int_{x_0}^{x_1} \frac{[P(x)]^2}{[\sigma(x)]^3} dx$$

en la cual

S_f representa el área bajo la llama en el horno;

x_0 es la abscisa en la dirección de flujo general del vidrio del extremo del área bajo llama (10) en el horno;

x_1 es la abscisa en la dirección de flujo general del vidrio del extremo de la cuenca de acondicionamiento;

$\sigma(x)$ representa el área de la sección de paso del vidrio del dispositivo en la abscisa x;

$P(x)$ representa el perímetro de la sección de paso del vidrio del dispositivo en la abscisa x; y

$\sum_i K_{Si}$ representa la suma de K_{Si} debidos a un elemento (17) singular en el dispositivo aguas abajo del área bajo la llama en el horno, un elemento singular que produce, de aguas arriba a aguas abajo y a través de menos de dos metros en la dirección de flujo del vidrio, una disminución en la sección de paso del vidrio de más del 10%, después un incremento en la sección de paso del vidrio de más de 10%, en donde

$$K_{S_i} = 0.0012 \times \left(\exp\left[5.16 \left(\frac{\sigma_i - \sigma_{S_i}}{\sigma_i} \right)^{2.55} \right] - 1 \right) \left(\frac{S_f}{\sigma_i'} \right)^2$$

representando σ_i el área de la sección de paso del vidrio justo aguas arriba del elemento singular S_i,

representando σ_{Si} el área de la sección de paso mínima producida por el elementos singular S_i.

2. El proceso según la reivindicación precedente, caracterizado porque K > 5.5.

3. El proceso según la reivindicación precedente, caracterizado porque K > 7.5.

4. El proceso según la reivindicación precedente, caracterizado porque K es mayor que 9, o incluso mayor que 10.5, o incluso mayor que 13.

5. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque la proporción del área bajo la llama en el horno al área de la cuenca de acondicionamiento es mayor que 1.4, e incluso mayor que 1.6, e incluso mayor que 1.8.

6. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque el horno es suficientemente profundo para que un bucle (14) de recirculación aguas arriba y un bucle (15) de recirculación aguas abajo se formen en el horno.

7. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque la cuenca de acondicionamiento comprende, de aguas arriba a aguas abajo, un cuello (4) y después un extremo (5) de trabajo.

8. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque el horno tiene una capacidad de 500 a 1500 m³ de vidrio y de manera más particular 700 a 1400 m³ de vidrio.

9. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque su demanda es de 400 a 1300 toneladas de vidrio por día.

10. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque los quemadores (7) de fuego transversal utilizan un oxidante que comprende 10 a 30% en volumen de O_2, se equipan con regeneradores y funcionan por pares y en modo inverso.

11. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque los quemadores de fuego transversal utilizan un oxidante que contiene de 80 a 100% en volumen de O_2.

12. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque en cualquier plano vertical transversal al eje longitudinal del horno en la cuenca de acondicionamiento, existen puntos en el vidrio que tienen un componente de velocidad longitudinal que apunta de aguas abajo a aguas arriba.

13. El proceso según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque después de la cuenca de acondicionamiento el vidrio pasa en un canal (6) que suministra por sí mismo a un dispositivo de formación, no produciéndose contraflujo alguno en el canal.

14. El proceso según la reivindicación precedente, caracterizado porque la longitud del canal (6) se comprende en el margen que se extiende de 0.3 a 10 m y especialmente en el margen que se extiende de 0.8 a 6 m.

15. Un proceso para fabricar vidrio plano caracterizado porque comprende fabricar vidrio fundido con el proceso de una de las reivindicaciones precedentes, transformándose entonces el vidrio fundido en vidrio plano en una cámara de flotación del vidrio en un baño de metal fundido.

16. Un dispositivo para fabricar vidrio fundido caracterizado porque comprende de aguas arriba a aguas abajo, un horno (1) para fundir y refinar vidrio equipado con quemadores (7) elevados de fuego transversal, después una cuenca de acondicionamiento que comprende uno o más compartimentos (4, 5), comprendiendo dicho horno una zona (2) de fusión y una zona (3) de refinamiento, siendo el fondo de la zona de refinamiento y el fondo de la cuenca de acondicionamiento suficientemente profundos para que un mismo bucle (15) de recirculación, denominado bucle aguas abajo, pase a través de la zona de refinamiento y a través de todos los compartimentos (4, 5) de la cuenca de acondicionamiento, suministrándose a dicha cuenca de acondicionamiento vidrio por el horno, siendo las dimensiones del dispositivo tales que K es mayor que 3.5, donde

$$K = K_a + \sum_i K_{S_i}$$

en la cual

$$K = 0.000727 \times S_f \times \int_{x_0}^{x_1} \frac{[P(x)]^2}{[\sigma(x)]^3} dx$$

en la cual

S_f representa el área bajo la llama en el horno;

x_0 es la abscisa en la dirección de flujo general del vidrio del extremo del área bajo llama (10) en el horno;

x_1 es la abscisa en la dirección de flujo general del vidrio del extremo de la cuenca de acondicionamiento;

$\sigma(x)$ representa el área de la sección de paso del vidrio del dispositivo en la abscisa x;

$P(x)$ representa el perímetro de la sección de paso del vidrio del dispositivo en la abscisa x;

$\sum_i K_{Si}$ representa la suma de K_{Si} debidos a un elemento (17) singular en el dispositivo aguas abajo del área bajo la llama en el horno, un elemento singular que produce, de aguas arriba a aguas abajo y a través de

menos dos metros en la dirección de flujo del vidrio, una disminución en la sección de paso del vidrio de más del 10%, después un incremento en la sección de paso del vidrio de más de 10%, en donde

$$K_{S_i} = 0.0012 \times \left(\exp\left[5.16 \left(\frac{\sigma_i - \sigma_{S_i}}{\sigma_i} \right)^{2.55} \right] - 1 \right) \left(\frac{S_f}{\sigma_i} \right)^2,$$

representando σ_i el área de la sección de paso del vidrio justo aguas arriba del elemento singular S_i,

representando σ_{Si} el área de la sección de paso mínima producida por el elemento singular S_i,

comprendiendo dicho dispositivo a través de su longitud total bloques de depósito que contienen el vidrio fundido, siendo la altura del vidrio la distancia entre el nivel (56) superior de los bloques (52, 52') de depósito disminuido por un margen (57) de seguridad comprendido entre 30 y 130 mm, en particular 80 mm, y el nivel (51) de fondo.

17. El dispositivo según la reivindicación precedente, caracterizado porque K > 5.5

18. El dispositivo según la reivindicación precedente, caracterizado porque K > 7.5

19. El dispositivo según la reivindicación precedente, caracterizado porque K es mayor que 9, o incluso mayor que 10.5, o incluso mayor que 13.

20. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque la proporción del área bajo la llama (10) en el horno al área de la cuenca de acondicionamiento es mayor que 1.4, e incluso mayor que 1.6, e incluso mayor que 1.8.

21. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque la proporción del área bajo la llama en el horno al área de la cuenca de acondicionamiento es menor que 4 y de preferencia menor que 3.

22. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque el horno es suficientemente profundo para que un bucle (14) de recirculación aguas arriba y un bucle (15) de recirculación aguas abajo se formen en el horno.

23. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque la cuenca de acondicionamiento comprende, de aguas arriba a aguas abajo, un cuello (4) y después un extremo (5) de trabajo.

24. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque el horno tiene una capacidad de 500 a 1500 m³ de vidrio y de manera más particular 700 a 1400 m³ de vidrio.

25. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque su demanda es de 400 a 1300 toneladas de vidrio por día.

26. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque los quemadores (7) de fuego transversal utilizan un oxidante que comprende 10 a 30% en volumen de O_2, se equipan con regeneradores y funcionan por pares y en modo inverso.

27. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque en cualquier plano vertical transversal al eje longitudinal del horno en la cuenca de acondicionamiento, existen puntos en el vidrio que tienen un componente de velocidad longitudinal que apunta de aguas bajo a aguas arriba.

28. El dispositivo según una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, caracterizado porque después de la cuenca de acondicionamiento el vidrio pasa en un canal (6) que suministra por sí mismo a un dispositivo de formación, no produciéndose contraflujo alguno en el canal.

29. El dispositivo según la reivindicación precedente, caracterizado porque la longitud del canal se comprende en el margen que se extiende de 0.3 a 10 m y especialmente en el margen que se extiende de 0.8 a 6 m.

30. Un dispositivo para fabricar vidrio plano que comprende el dispositivo para fabricar vidrio fundido de una de las reivindicaciones de dispositivo precedentes, seguido por una cámara de flotación del vidrio en un baño de metal fundido.

31. El dispositivo según una de las reivindicaciones 16 a 30, caracterizado porque existe un nivel (55) de la superficie de vidrio a una distancia comprendida entre 30 y 130 mm bajo el nivel (56) superior de los

bloques (52, 52') de depósito, de tal manera que K es mayor que 3.5 y de preferencia mayor que 5.5 y de manera más preferida mayor que 7.5, en particular mayor que 9, incluso mayor que 10.5, incluso mayor que 13.

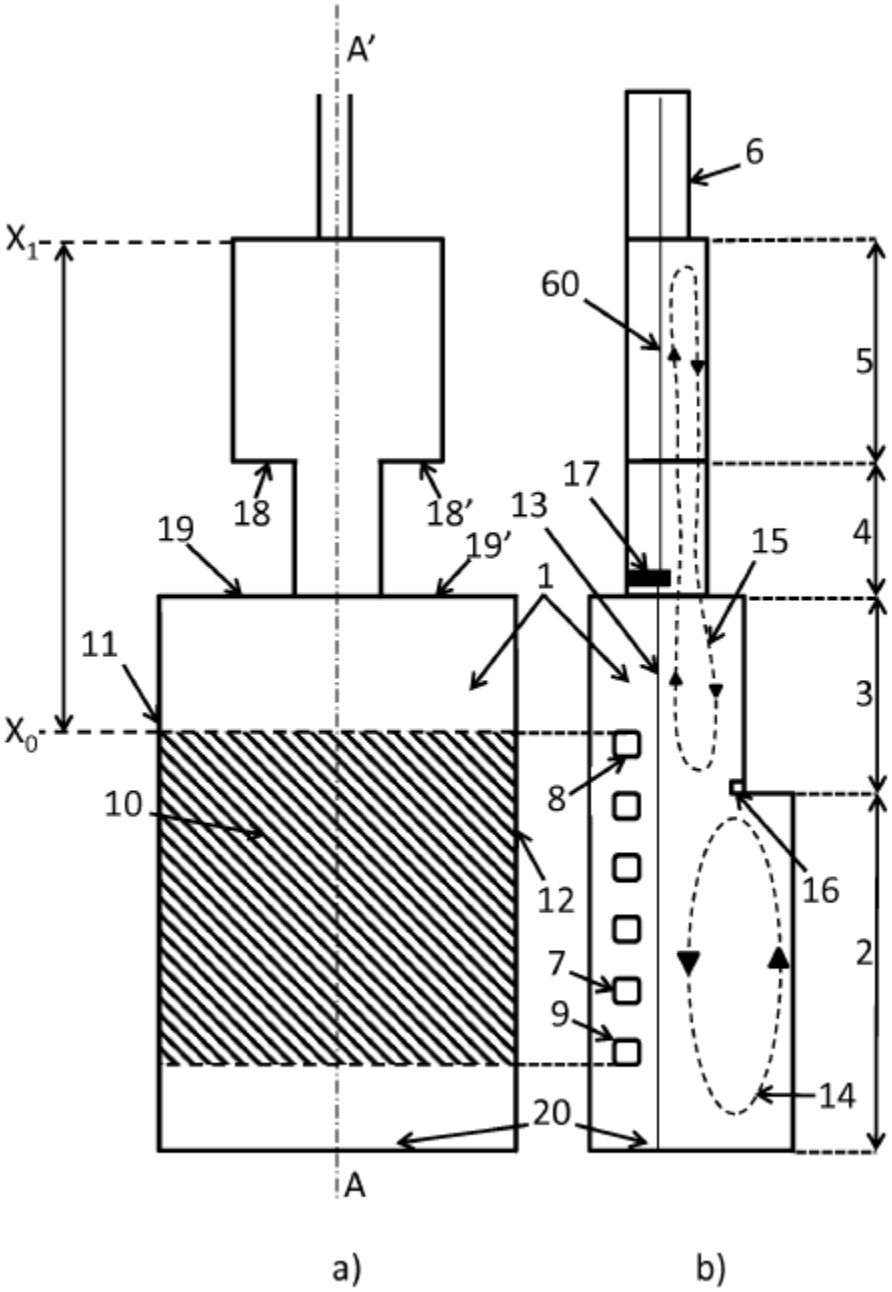

Fig 1

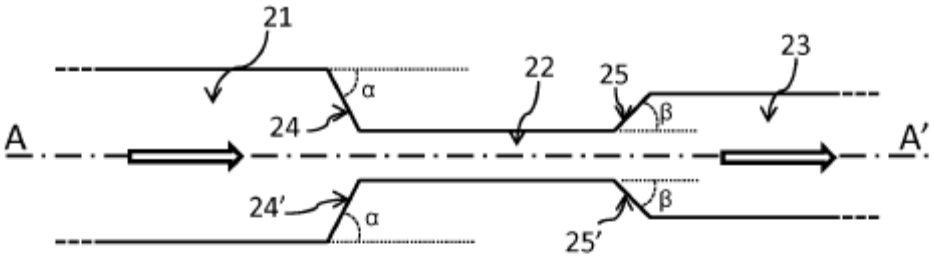

Fig 2

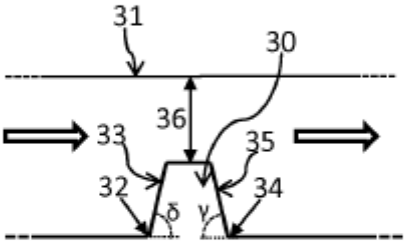

Fig 3

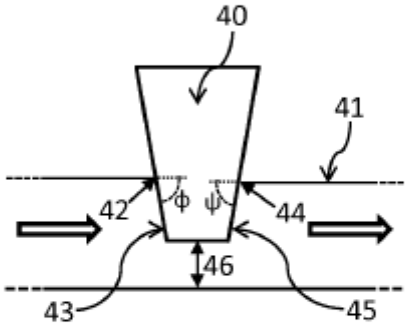

Fig 4

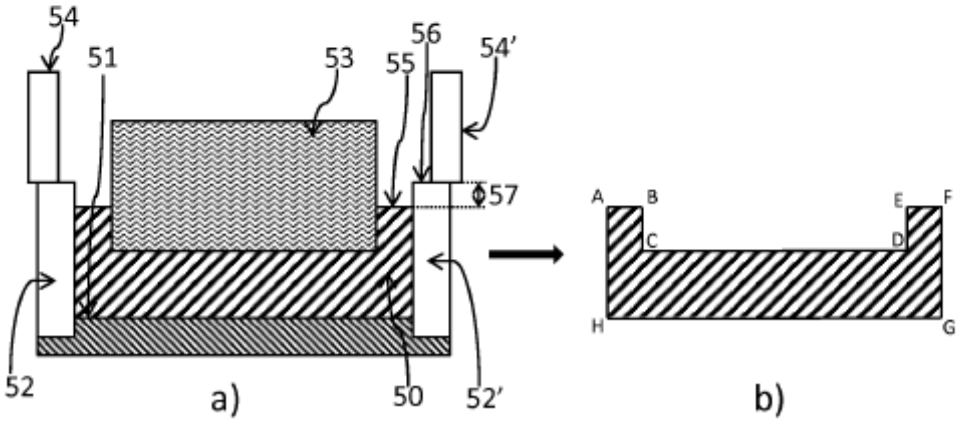

Fig 5