

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 915 259**

51 Int. Cl.:

A23B 5/14 (2006.01)

B65D 81/28 (2006.01)

B65D 85/32 (2006.01)

A23L 3/3526 (2006.01)

B06B 3/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.06.2008 PCT/US2008/068697**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.01.2009 WO09006360**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.06.2008 E 08772220 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.05.2022 EP 2195122**

54 Título: **Sistema de reactor ultrasónico de alta capacidad**

30 Prioridad:

03.07.2007 US 947763 P

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

21.06.2022

73 Titular/es:

**INDUSTRIAL SONOMECHANICS, LLC (100.0%)
1505 St. Nicholas Avenue
New York, NY 10033, US**

72 Inventor/es:

**PESHKOVSKY, SERGEL, L. y
PESHKOVSKY, ALEXEY, S.**

74 Agente/Representante:

URÍZAR VILLATE, Ignacio

ES 2 915 259 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

Sistema de reactor ultrasónico de alta capacidad

5 **Referencia cruzada a solicitud relacionada**

La presente solicitud reivindica la prioridad de la Solicitud Provisional de EE. UU. n.º 60/947.768, presentada el 3 de julio de 2007.

10 **Antecedentes de la invención**

1. Campo de la invención

15 La presente invención se refiere al campo de los equipos ultrasónicos y, más concretamente, los sistemas de transmisión de energía acústica a medios líquidos durante procesos sonoquímicos y sonomecánicos basados en cavitación acústica.

2. Descripción de la técnica relacionada

20 Las ventajas de usar la cavitación acústica inducida por ultrasonidos para llevar a cabo procesos tecnológicos en líquidos están bien documentadas, por ejemplo, en las siguientes referencias: K.S. Suslick, Sonochemistry, Science 247, págs. 1439-1445 (1990); T.J. Mason, Practical Sonochemistry, A User's Guide to Applications in Chemistry and Chemical Engineering, Ellis Norwood Publishers, West Sussex, Inglaterra (1991).

25 En los sistemas ultrasónicos anteriores diseñados para procesos sonoquímicos y sonomecánicos industriales, el líquido se somete comúnmente a tratamiento ultrasónico a medida que fluye a través de un reactor. Este último consiste comúnmente en una cámara de reactor que incorpora un radiador de guía de ondas ultrasónicas (bocina) conectado a un transductor electroacústico. La bocina se usa para amplificar la amplitud de vibración del transductor, lo cual es necesario porque la amplitud de vibración del transductor en sí no es suficiente para la mayoría de los
30 procesos industriales. Dichos sistemas de reactores ultrasónicos se describen, por ejemplo, en la Solicitud de Patente Publicada de EE. UU. n.º 2006/0196915, la Solicitud de Patente Publicada de EE. UU. n.º 2005/0274600 y la Patente de EE. UU. n.º 7.157.058.

35 Todos los sistemas mencionados anteriormente tienen un importante inconveniente común, que restringe su capacidad para crear potentes campos de cavitación ultrasónica y limita su capacidad de producción. Este inconveniente proviene del hecho de que las bocinas acústicas usadas en la técnica generalmente tienen formas ahusadas, tales como cónicas, exponenciales, catenoidales, escalonadas o más complejas, que convergen en la dirección de la carga. Si bien estas bocinas pueden tener factores de ganancia elevados y permitir amplitudes de vibración significativamente mayores, el aumento se produce siempre a expensas de las áreas de superficie de
40 salida, que se vuelven pequeñas como resultado. Por lo tanto, si bien las bocinas convergentes son capaces de aumentar la potencia acústica específica (o la amplitud de vibración a una frecuencia ultrasónica determinada) radiada por un transductor en una carga con bastante eficacia, no permiten alcanzar niveles significativos de potencia acústica radiada total. La potencia total proporcionada por un generador y un transductor, por lo tanto, no se transmite eficientemente al líquido (se refleja hacia atrás). En consecuencia, los reactores sonoquímicos basados
45 en estas bocinas son efectivos solo a escala de laboratorio. El éxito de las aplicaciones industriales de tales sistemas es limitado. Además, en el diseño de los reactores ultrasónicos mencionados anteriormente, no se tiene en cuenta el tamaño y la forma del propio campo de cavitación, lo que reduce aún más su eficiencia.

50 En la obra de G. Cervant, J.-L. Laborde, *et al.*, "Spatio-Temporal Dynamics of Cavitation Bubble Clouds in a Low Frequency Reactor", Ultrasonic Sonochemistry 8(2001), 163-174, se describe en detalle un estudio teórico que describe la forma, el tamaño y la posición del campo de cavitación formado bajo un radiador ultrasónico. En el artículo de A. Moussatov, R. Mettin, C. Granger *et al.* "Evolution of Acoustic Cavitation Structures Near Larger Emitting Surface", WCU 2003, París, 7-10 de septiembre de 2003, se realizó un estudio experimental similar. Los resultados muestran que durante el funcionamiento de una bocina acústica, un campo de cavitación estable y bien
55 desarrollado solo comienza a formarse cuando se cumplen las siguientes dos condiciones necesarias: (1) la intensidad específica de la energía ultrasónica radiada en el líquido supera los 8 W/cm² (para agua) y (2) el diámetro de salida de la sección transversal del radiador es del orden de la longitud de onda acústica, λ , en la carga líquida suministrada original (antes de que haya comenzado la cavitación). En otras palabras, el radiador debe transmitir una onda acústica plana al líquido. En este caso, el campo de cavitación comienza a estabilizarse y toma la forma de
60 un cono circular invertido. Es importante señalar también que tal campo de cavitación estable en las condiciones descritas tiene el máximo tamaño geométrico posible. Por lo tanto, solo si tal campo de cavitación estable puede establecerse en un reactor ultrasónico, se maximizará la productividad y se alcanzará la estabilidad óptima y la calidad operativa. Sin embargo, en los estudios mencionados anteriormente no se obtuvo el tamaño exacto del campo de cavitación formado bajo un radiador ultrasónico. Además, no se estudió la cavitación formada cerca de la
65 superficie lateral del radiador.

La deposición de 8 W/cm^2 (para agua) de potencia acústica específica requiere que las amplitudes de la velocidad de vibración de la superficie de salida de una bocina acústica alcancen aproximadamente 140 - 150 cm/s (amplitudes oscilatorias de aproximadamente 25 - 30 micras (rms) a 20 kHz). Dado que la mayoría de los materiales usados para fabricar transductores magnetostrictivos o piezocerámicos no pueden proporcionar amplitudes de velocidad de vibración superiores a 50 - 70 cm/s (mucho menos para los materiales de transductores piezocerámicos), se debe utilizar una bocina ultrasónica que tenga un factor de ganancia de al menos 3 y, preferentemente, mayor que eso. Dado que la velocidad del sonido en la mayoría de los líquidos de interés, tal como agua, aceites, alcoholes, etc., es del orden de 1500 m/s, λ , en esos líquidos a las frecuencias ultrasónicas de trabajo comunes de 18 - 22 kHz es de aproximadamente 65 - 75 mm. Como se mencionó anteriormente, es necesario que el diámetro de la superficie de salida de la bocina esté cerca de λ , en la carga líquida. En consecuencia, solo las bocinas que proporcionan amplitudes oscilatorias de salida alta (factores de ganancia altos) y tienen áreas de superficie de salida grandes simultáneamente son verdaderamente apropiadas para el uso en sistemas de reactores ultrasónicos industriales de alta capacidad eficientes para procesos sonomecánicos y sonoquímicos. Ninguna de las bocinas convergentes comunes es, por lo tanto, apropiada.

Un diseño anterior de "bocina Barbell", Patente de EE. UU. n.º 7.156.201, elude en gran medida la limitación mencionada anteriormente de bocinas convergentes, y puede proporcionar amplitudes oscilatorias de salida alta (factores de ganancia altos) y grandes áreas de superficie de salida simultáneamente. En la misma referencia, también se presenta una versión modificada de la bocina Barbell, que puede llamarse "bocina Barbell larga". Esta bocina tiene una superficie de radiación lateral muy grande y también es conveniente para el uso en sistemas de reactores ultrasónicos industriales eficientes de alta capacidad.

Sin embargo, la anterior "bocina Barbell", sus derivados, así como los diseños de reactores ultrasónicos relacionados están sujetos a algunas limitaciones importantes. La Patente de EE.UU. n.º 7.156.201 proporciona un sistema de ecuaciones que solo es adecuado para el cálculo de las bocinas Barbell con secciones de transición en forma de cono (partes de las bocinas que tienen secciones transversales cambiantes). Adicionalmente, existe una restricción en la descripción y en las reivindicaciones de la misma referencia, que requiere que la longitud de cualquier sección de transición sea igual o mayor que $\text{Log}(N)/k$, donde $k = \omega/C$ es el número de onda para la sección de transición, N es la relación de los diámetros de las secciones cilíndricas gruesas y delgadas que son adyacentes a la sección de transición, ω es la frecuencia de vibración angular, C es la velocidad del sonido en el material de bocina en la sección de transición (teniendo en cuenta la dispersión de velocidad de fase). Esta restricción provino del hecho de que la longitud especificada de la sección de transición es crítica desde el punto de vista del paso de una onda acústica longitudinal. Se pensó que tal selección de la longitud de la sección de transición era necesaria para disminuir el grado de tensión y presión dinámicas a lo largo de la longitud de la sección y así aumentar la vida operativa del radiador de guía de ondas. Los principios de diseño y el método de cálculo para las bocinas que están libres de esta restricción no estaban disponibles y no se proporcionan en los diseños anteriores.

Además, los únicos diseños de reactores ultrasónicos son los que se basan en bocinas Barbell equipadas con elementos de resonancia adicionales, tal como discos vibratorios, esferas, superficies helicoidales, etc. Todos estos elementos adicionales complican significativamente la construcción de las bocinas Barbell, introducen conexiones mecánicas adicionales y, por lo tanto, reducen la vida útil y la confiabilidad. También está claro que utilizar las bocinas Barbell o cualquiera de sus versiones modificadas en un volumen no restringido o incorrectamente restringido (cámara de reactor) conduce a un proceso ineficiente, ya que no todo el líquido pasa a través de la zona de campo de cavitación bien desarrollada y/o no se alcanza el tiempo óptimo de tratamiento en el campo de cavitación.

Por lo tanto, para poder maximizar el efecto del tratamiento de cavitación ultrasónica sobre una carga líquida (líquido puro, mezcla líquida, emulsión líquida, suspensión de partículas sólidas en un líquido, polímeros fundidos, etc.), existe una necesidad bien definida de desarrollar: 1) diseños mejorados de bocina Barbell, sin las limitaciones antes mencionadas y 2) diseños mejorados de reactores ultrasónicos en los que una bocina Barbell (de un diseño novedoso introducido en esta invención o de un diseño descrito en la técnica) se coloca correctamente dentro de un volumen de flujo a través (o estacionario) (también llamado cámara de reactor, celda de flujo, etc.).

Breve resumen de la invención

Por lo tanto, es un objeto principal y una ventaja de la presente invención proporcionar un sistema de reactor ultrasónico de alta capacidad que aumente la cantidad total de energía acústica radiada en un medio líquido por el sistema de reactor ultrasónico.

Es un objeto adicional y una ventaja de la presente invención proporcionar un sistema de reactor ultrasónico de alta capacidad que aumente la superficie de radiación disponible y la uniformidad de la distribución de energía acústica en todo el volumen de un sistema de reactor ultrasónico.

Es un objeto y ventaja más de la presente invención proporcionar un sistema de reactor ultrasónico de alta capacidad que aumente la intensidad de la energía acústica radiada en el medio líquido de un sistema de reactor ultrasónico.

Es otro objeto y ventaja de la presente invención proporcionar un sistema de reactor ultrasónico de alta capacidad que maximice la eficiencia de transferencia de la energía eléctrica del generador ultrasónico a la energía acústica radiada en el medio líquido.

5 Es un objeto adicional y una ventaja de la presente invención proporcionar un sistema de reactor ultrasónico de alta capacidad que mejore la calidad de funcionamiento y aumente la vida útil operativa de la bocina ultrasónica incorporada en el sistema de reactor ultrasónico.

10 Es un objeto y una ventaja más de la presente invención proporcionar un sistema de reactor ultrasónico de alta capacidad que maximice la capacidad de producción del sistema de reactor ultrasónico.

De acuerdo con los objetos y ventajas anteriores, la presente invención proporciona varios diseños novedosos de bocinas Barbell de acuerdo con las reivindicaciones adjuntas.

15 En una primera realización de la presente invención, como se establece en la reivindicación 1, se introduce un diseño novedoso de bocina Barbell, en el que la primera sección de transición es corta (más corta que el valor $\text{Log}(N)/k$) y tiene una forma catenoidal (mencionada en el presente documento como bocina Barbell catenoidal).

20 Breve descripción de los dibujos

La presente invención se entenderá y apreciará mejor leyendo la siguiente Descripción Detallada junto con los dibujos adjuntos, en los que:

25 la figura 1 es una bocina Barbell catenoidal de acuerdo con una realización de la presente invención.
La figura 2 es un conjunto de bocina Barbell con transductor catenoidal de acuerdo con otra realización de la presente invención.
La figura 3 es una bocina Barbell larga catenoidal (o conjunto de bocina Barbell con transductor largo catenoidal) de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

30 La figura 4 es una bocina Barbell modelada (o conjunto de bocina Barbell con transductor modelado) de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.
La figura 5 son dos versiones de una bocina Barbell extendida (o conjunto de bocina Barbell con transductor extendido) de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

35 La figura 6 es una bocina Barbell hueca (o conjunto de bocina Barbell con transductor hueco) de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.
La figura 7 es una fotografía de un campo de cavitación estable bien desarrollado creado en el agua debajo de la superficie de radiación de salida de un dispositivo Barbell.
La figura 8 es una fotografía de un campo de cavitación estable creado en el agua cerca de la superficie lateral de un dispositivo Barbell.

40 La figura 9 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en un dispositivo Barbell, tal como bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los correspondientes conjuntos de bocina Barbell con transductor, de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.
La figura 10 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en un dispositivo Barbell, tal como bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los correspondientes conjuntos de bocina

45 Barbell con transductor, de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.
La figura 11 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en un dispositivo Barbell, tal como bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los correspondientes conjuntos de bocina Barbell con transductor, de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

50 La figura 12 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell larga, una bocina Barbell larga catenoidal o un conjunto de bocina Barbell con transductor largo correspondiente, de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.
La figura 13 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell extendida (o conjunto de bocina Barbell con transductor extendido), de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

55 La figura 14 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en otra versión de una bocina Barbell extendida (o conjunto de bocina Barbell con transductor extendido), de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.
La figura 15 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell hueca (o conjunto de bocina Barbell con transductor hueco) con una región hueca interna corta de acuerdo con otra realización que no forma

60 parte de la presente invención.
La figura 16 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell hueca (o conjunto de bocina Barbell con transductor hueco) con una región hueca interna larga de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

65 La figura 17 es otra versión de un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell hueca (o conjunto de bocina Barbell con transductor hueco) con una región hueca interna larga de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

La figura 18 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell hueca (o conjunto de bocina Barbell con transductor hueco) con una región hueca interna corta o larga y una bocina genérica que funciona en fase de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

La figura 19 es un esquema de un dispositivo para el tratamiento de polímeros fundidos de alta viscosidad con ultrasonidos de alta intensidad de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

La figura 20 es una vista ampliada de un reactor ultrasónico de flujo a través para el tratamiento de polímeros fundidos de alta viscosidad con ultrasonidos de alta intensidad de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

La figura 21 es un esquema de un dispositivo para el tratamiento de polímeros fundidos de alta viscosidad con ultrasonidos de alta intensidad basado en el principio de extrusión en cascada de acuerdo con otra realización que no forma parte de la presente invención.

La figura 22 es una fotografía de un campo de cavitación formado en un polímero fundido estático de alta viscosidad formado bajo la superficie radiante de salida de un dispositivo Barbell.

La figura 23 es una fotografía de un campo de cavitación formado en un polímero fundido de alta viscosidad que fluye a través de un canal de conformación transparente, formado bajo la superficie radiante de salida de un dispositivo Barbell.

Descripción detallada de la invención

Realización 1 - Bocina Barbell Catenoidal

La patente de EE. UU. n.º 7.156.201 proporciona un sistema de ecuaciones que solo es adecuado para calcular las bocinas Barbell (o conjuntos de bocina Barbell con transductor) con secciones de transición en forma de cono (partes de las bocinas que tienen secciones transversales cambiantes). Adicionalmente, existe una restricción en la descripción y en las reivindicaciones de la misma referencia, que requiere que la longitud de cualquier sección de transición sea igual o mayor que $\text{Log}(N)/k$, donde $k = \omega/C$ es el número de onda, N es la relación de los diámetros de las secciones cilíndricas gruesas y delgadas que son adyacentes a la sección de transición, ω es la frecuencia de vibración angular, C es la velocidad del sonido en el material de bocina en la sección de transición (teniendo en cuenta la dispersión de velocidad de fase). Esta restricción provino del hecho de que la longitud especificada de la sección de transición es crítica desde el punto de vista del paso de una onda acústica longitudinal. Se pensó que tal selección de la longitud de la sección de transición era necesaria para disminuir el grado de tensión y presión dinámicas a lo largo de la longitud de la sección y así aumentar la vida operativa del radiador de guía de ondas. Los principios de diseño y el método de cálculo para las bocinas que están libres de esta restricción no estaban disponibles y no se proporcionan en la técnica.

En la presente invención se ha determinado que cuando la sección transversal de la sección de transición cambia de acuerdo con un patrón más complejo, tal como la ley catenoidal, el grado de presión y tensión dinámica a lo largo de la longitud de sección no alcanza niveles peligrosos incluso cuando la sección es más corta que la restricción mencionada anteriormente. Esto se debe al hecho de que cuando el diámetro de la sección transversal de la sección de transición cambia de acuerdo con la ley catenoidal, siempre se logra una transición muy suave hacia la superficie de la sección cilíndrica adyacente. Los valores de longitud de la sección de transición correspondientes a la condición $L < \text{Log}(N)/k$, donde el operador Log es un logaritmo natural, son críticos con respecto al valor de k , que se vuelve imaginario para las formas de la sección de transición exponencial. Para las formas de sección de transición catenoidales, el valor k se vuelve imaginario en valores más bajos de L , específicamente $L < \text{Arch}(N)/k$, donde el operador ch es un cosigno hiperbólico. Dado que en este caso el valor de $k = i|k|$ es imaginario, las ecuaciones proporcionadas en la patente de EE. UU. n.º 7.156.201 también se pueden usar para los cálculos de las bocinas Barbell con secciones de transición catenoidales si las funciones trigonométricas se reemplazan por las funciones hiperbólicas. Usando tales cálculos, es posible construir una bocina Barbell catenoidal que tenga una sección de transición significativamente más corta que $\text{Log}(N)/k$ sin presiones y/o tensiones dinámicas altas.

El siguiente ejemplo proporciona una aclaración de la explicación teórica mencionada anteriormente. La bocina Barbell catenoidal se calculó para la frecuencia de operación de 20 kHz, teniendo una primera sección de transición catenoidal de longitud significativamente menor que el valor $\text{Log}(N)/k$. La figura 1 muestra una bocina Barbell catenoidal de acuerdo con la primera realización de la presente invención, donde $V(z)$ - distribución de la amplitud de la velocidad de vibración a lo largo de la longitud de la bocina, $e(z)$ - distribución de la deformación a lo largo de la longitud de la bocina, representando las longitudes L_1 - L_5 las longitudes de los elementos de bocina correspondientes, respectivamente. En una realización preferida, la bocina Barbell catenoidal tiene las siguientes longitudes: $L_1 = 54,33$ mm, $L_2 = 20,61$ mm, $L_3 = 54,33$ mm, $L_4 = 41,22$ mm, $L_5 = 106,71$ mm, ganancia = 5,16, $D_0 = D_2 = 50$ mm, frecuencia = 20 kHz y se fabrica en aluminio 2024. Puede verse en la figura que aunque la sección de transición L_2 es significativamente más corta que $\text{Log}(N)/k$, el cambio de deformación a lo largo de la bocina es suave y continuo, sin discontinuidades peligrosas asociadas con altos grados de presión y tensión. La bocina calculada se construyó y probó, mostrando una excelente correlación de sus propiedades con las predichas en los cálculos.

Realización 2 - Conjunto de bocina Barbell con transductor Catenoidal

La bocina Barbell que incorpora un transductor acústico activo para convertir energía eléctrica en energía acústica se describió en la Patente de EE. UU. N.º 7.156.201. En este dispositivo, los transductores anulares piezoeléctricos están situados en la bocina Barbell cerca de las ubicaciones de los nodos y, dado que la bocina Barbell utilizada tiene un factor de ganancia superior a la unidad, la amplitud de las vibraciones en el extremo de salida del conjunto es mucho mayor que la amplitud de las vibraciones de los propios transductores anulares piezoeléctricos.

La primera sección de transición de este dispositivo, sin embargo, se limitaba a tener una forma cónica y una longitud igual o mayor que el valor $\text{Log}(N)/k$ (Conjunto de bocina Barbell con transductor cónico). En la presente invención, se introduce un conjunto de bocina Barbell con transductor catenoidal, que tiene una primera sección de transición catenoidal de longitud significativamente menor que el valor $\text{Log}(N)/k$. La figura 2 muestra este conjunto junto con las distribuciones de la amplitud de la velocidad de vibración, $V(z)$, y la deformación, $e(z)$, a lo largo de la longitud del conjunto, indicando L11 - L17 las longitudes de los elementos de conjunto correspondientes, respectivamente. En una realización preferente, el conjunto de bocina Barbell con transductor catenoidal tiene las siguientes dimensiones: L11 = 17,96 mm, L12 = 32,00 mm, L13 = 12,3 mm, L14 = 20,6 mm, L15 = 49,46 mm, L16 = 41,22 mm, L17 = 106,71 mm, G = 6,07, D0 = D2 = 50 mm, d = 20 mm, F = 20 kHz, y está hecho de aluminio 2024 y cerámica APC 841 (APC International Ltd., EE. UU.). El dibujo muestra que aunque la sección de transición L4 es significativamente más corta que $\text{Log}(N)/k$, el cambio de deformación a lo largo del conjunto es suave y continuo, sin discontinuidades peligrosas asociadas con altos grados de presión y tensión. El conjunto calculado se construyó y probó, mostrando una excelente correlación de sus propiedades con las predichas en los cálculos.

Realización 3 - (que no forma parte de la invención) Bocina Barbell larga catenoidal (Conjunto de bocina Barbell con transductor largo catenoidal)

Se describió una modificación de la bocina Barbell en la patente de EE. UU. n.º 7.156.201, en la que la radiación también se produce desde la superficie lateral. La bocina está hecha en forma de secciones cilíndricas alternas y secciones de sección transversal variable. Las superficies de las secciones de sección transversal variable tienen componentes de amplitud de vibraciones que se dirigen perpendicularmente al eje principal de la bocina. Además, las longitudes de las secciones de bocina se calculan de tal manera que los componentes de la amplitud de vibración de las secciones de sección transversal variable que están dirigidas a lo largo del eje de la guía de ondas están orientados entre sí. De esta manera, se logra una fuerte radiación lateral del radiador de guía de ondas. Dado que no existen limitaciones teóricas sobre la longitud total de la bocina, el área total de su superficie radiante lateral puede ser arbitrariamente grande correspondiente a una cantidad arbitrariamente grande de la energía acústica total radiada en un líquido. La primera sección de transición de este dispositivo, sin embargo, se limitaba a tener una forma cónica y una longitud igual o mayor que el valor $\text{Log}(N)/k$. En la presente invención, se introduce una bocina Barbell larga catenoidal, que tiene una primera sección de transición catenoidal de una longitud significativamente más corta que el valor $\text{Log}(N)/k$, como se muestra en la figura 3. Además, se pueden incorporar transductores anulares piezoeléctricos cerca de las ubicaciones nodales de esta bocina, convirtiéndola en un conjunto de bocina Barbell con transductor largo catenoidal.

Realización 4 - (que no forma parte de la invención) Bocina Barbell modelada (Conjunto de bocina Barbell con transductor modelado)

Para aumentar la superficie radiante total de una bocina Barbell y, por lo tanto, para lograr un aumento en la energía radiada total, se pueden usar elementos radiantes adicionales, tal como placas y esferas resonantes, tal como se describe en la patente de EE. UU. n.º 7.156.201. Los elementos pueden conectarse acústicamente de forma rígida a la bocina mediante conexiones soldadas, soldadas blandas o roscadas. Sin embargo, debido a que los elementos no se mecanizan como partes integrales de las bocinas, sino que se unen después, las bocinas resultantes tienen "puntos débiles" en las conexiones y podrían romperse a altas amplitudes de vibración durante las cuales sufren deformaciones significativas que cambian de signo.

En la presente invención, se introduce un diseño de bocina Barbell que incorpora elementos radiantes adicionales, que se mecanizan como partes integrales de la bocina, como se muestra en la figura 4. La sección cilíndrica de salida del dispositivo tiene una serie de ranuras 21 y protuberancias 22 especialmente colocadas, que pueden ser horizontales (ortogonales al eje principal de la bocina) o estar dispuestas como roscas de tornillo derechas e izquierdas que se cruzan colocadas en un ángulo con el eje principal de la bocina. Este sistema de ranuras y protuberancias permite aumentar significativamente la energía acústica total radiada desde la superficie lateral del dispositivo y mejora el efecto ultrasónico sobre la carga líquida a medida que se mueve dentro de la cámara del reactor. La primera sección de transición de esta bocina puede tener una forma catenoidal corta como se describe en la presente invención. Además, se pueden incorporar transductores anulares piezoeléctricos cerca de las ubicaciones nodales de esta bocina, convirtiéndola en un Conjunto de bocina Barbell con transductor modelado.

Realización 5 - (que no forma parte de la invención) Bocina Barbell extendida (Conjunto de bocina Barbell con transductor extendido)

Para aumentar la superficie radiante total de una bocina Barbell y, por lo tanto, lograr un aumento en la energía radiada total, se pueden incorporar secciones cilíndricas radiantes adicionales de diferentes diámetros, mecanizadas

como partes integrales de la bocina como se ve en la figura 5. Esta bocina tiene superficies radiantes adicionales ortogonales a su eje principal, formadas debido a las diferencias en los diámetros de las secciones cilíndricas, que son las principales responsables de la mayor radiación de energía acústica. La primera sección de transición de esta bocina puede tener una forma catenoidal corta como se describe en la presente invención. Además, se pueden incorporar transductores anulares piezoeléctricos cerca de las ubicaciones nodales de la bocina, convirtiéndola en un Conjunto de bocina Barbell con transductor extendido.

Realización 6 - (que no forma parte de la invención) Bocina Barbell hueca (Conjunto de bocina Barbell con transductor hueco)

De la teoría de la acústica se deduce que se requiere que el diámetro de la sección transversal de cualquier bocina ultrasónica sea menor que aproximadamente $\lambda/4$, donde λ es la longitud de onda del ultrasonido en el material de la bocina. Esto, sin embargo, se relaciona solo con la sección transversal "viva", o que realmente está llena de material de bocina. Si una parte de la sección transversal está formada por una región hueca, esa parte no debe incluirse en esta restricción. Esta importante condición permite calcular una bocina Barbell con una región hueca corta en su última sección de salida o una región hueca larga en su última sección de salida y la sección adyacente a esta, como se muestra en la figura 6, donde $V(z)$ - distribución de la amplitud de la velocidad de vibración a lo largo de la longitud de la bocina, $e(z)$ - distribución de la deformación a lo largo de la longitud de la bocina, indicando L41 - L45 las longitudes de los elementos de bocina correspondientes, respectivamente. Es importante señalar que en este caso el diámetro total de la sección de salida de la bocina puede ser mucho mayor que $\lambda/4$ incluso con un factor de ganancia alto. La superficie radiante principal de la bocina durante su funcionamiento en una carga líquida, por lo tanto, se convierte en la superficie lateral acumulada de su región hueca, incluidas las superficies exterior e interior, ya que ambas están colocadas en un ángulo significativo con respecto al eje principal de la bocina y, por lo tanto, tienen grandes componentes longitudinales de vibración. La superficie radiante acumulada de esta bocina y, por lo tanto, su energía acústica radiada total puede ser mucho mayor que la de una bocina Barbell común. La longevidad y confiabilidad de esta bocina también es muy alta porque está mecanizada como una unidad integral. La primera sección de transición de esta bocina puede tener una forma catenoidal corta como se describe en la presente invención. Además, se pueden incorporar transductores anulares piezoeléctricos cerca de las ubicaciones nodales de la bocina, convirtiéndola en un Conjunto de bocina Barbell con transductor hueco.

La figura 7 es una fotografía obtenida experimentalmente de un campo de cavitación estable bien desarrollado creado en un volumen no restringido de agua debajo de la superficie radiante de salida de un dispositivo Barbell, que tiene los siguientes parámetros operativos: diámetro de la superficie de salida - 65 mm, frecuencia de ultrasonido - 18 kHz, potencia acústica específica - 20 W/cm².

La figura 8 es una fotografía obtenida experimentalmente de un campo de cavitación estable creado en un volumen no restringido de agua cerca de la superficie lateral de un dispositivo Barbell (marcado con una línea blanca), que tiene los siguientes parámetros operativos: diámetro de la superficie de salida - 65 mm, frecuencia de ultrasonido - 18 kHz, potencia acústica específica - 20 W/cm².

Realización 7 - (que no forma parte de la invención) Reactor ultrasónico basado en un dispositivo Barbell, tal como la bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los Conjuntos de bocina Barbell con transductor correspondientes

Haciendo referencia a la figura 9, se ve un reactor ultrasónico de flujo a través basado en un dispositivo Barbell, tal como bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los Conjuntos de bocina Barbell con transductor correspondientes, de acuerdo con la séptima realización de la presente invención. El reactor comprende un transductor electroacústico 51, un dispositivo Barbell 52, una válvula 53, una cámara de reactor 54 y una válvula 55.

Realización 8 - (que no forma parte de la invención) Reactor ultrasónico basado en un dispositivo Barbell, tal como la bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los Conjuntos de bocina Barbell con transductor correspondientes

La figura 10 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en un dispositivo Barbell, tal como bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los Conjuntos de bocina Barbell con transductor correspondientes, de acuerdo con la octava realización de la presente invención. El reactor está equipado con una superficie de reflexión circular y comprende un transductor electroacústico 61, un dispositivo Barbell 62, una válvula 63, una cámara de reactor 64, una válvula 65 y una superficie de reflexión circular 66.

Realización 9 - (que no forma parte de la invención) Reactor ultrasónico basado en un dispositivo Barbell, tal como la bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los Conjuntos de bocina Barbell con transductor correspondientes

La figura 11 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en un dispositivo Barbell, tal como bocina Barbell, bocina Barbell catenoidal, bocina Barbell modelada o cualquiera de los Conjuntos de bocina Barbell con transductor

correspondientes, de acuerdo con la novena realización de la presente invención. El reactor está equipado con una superficie de reflexión circular y un inserto en la parte inferior, en forma de cono circular invertido, y comprende un transductor electroacústico 71, una bocina Barbell 72, una válvula 73, una cámara de reactor 74, un inserto de cono circular invertido 75, una válvula 76 y una superficie de reflexión circular 77.

Resultados experimentales que ilustran las realizaciones 7 - 9

Es bien sabido que durante la cavitación acústica la energía acústica es absorbida prácticamente en su totalidad por la carga líquida en la zona de cavitación activa y que la propia cavitación acústica es el mecanismo que convierte la energía acústica absorbida en calor. Por lo tanto, la eficacia y el grado de actividad tecnológica de un aparato ultrasónico dado pueden juzgarse por la cantidad de calor depositado en la zona de cavitación durante su funcionamiento. En otras palabras, la maximización y optimización del volumen de la zona activa y la intensidad de la cavitación en un reactor ultrasónico dado conduce a la maximización y optimización de los efectos tecnológicos obtenidos durante el funcionamiento del reactor.

A continuación se presenta una serie de experimentos, en los que se usan las consideraciones antes mencionadas para evaluar las realizaciones séptima a novena de la presente invención. La carga líquida utilizada en estos experimentos fue agua del grifo sedimentada durante un período de 24 horas. La cantidad de calor producido debido a la energía acústica absorbida por la carga líquida se midió mediante un método de calorimetría directa, como se describe en las siguientes referencias: S.L. Peshkovski, A.S. Peshkovski, Ultrason. Sonochem. 14 (2007) 314 y S.L. Peshkovski, A.S. Peshkovski, Ultrason. Sonochem. 15 (2008) 618.

De acuerdo con las ecuaciones proporcionadas en la Patente de EE. UU. N.º 7.156.201 y en la publicación, S.L. Peshkovski, A.S. Peshkovski, Ultrason. Sonochem. 14 (2007) 314, se calculó y construyó una bocina Barbell de aleación de titanio con los siguientes parámetros principales: diámetro de la punta de salida - 65 mm, superficie de la punta de salida - 33,2 cm², amplitud de vibración de salida - 25 micras (rms), frecuencia de vibración ultrasónica - 20 kHz, velocidad de oscilación de la punta de salida - 314 cm/s (rms). También se construyeron tres tipos de cámaras del reactor para los experimentos, correspondientes a las realizaciones séptima a novena de la presente invención (figuras 9 - 11). Las tres cámaras del reactor estaban equipadas con paredes termoaisladas con sensores de calor incorporados. La distancia entre la punta de salida de la bocina Barbell y la parte inferior de la cámara del reactor (o la parte superior del inserto de cono usado en la novena realización que se muestra en la figura 11) fue de 70 mm. La amplitud de vibración se mantuvo constante durante los experimentos.

Experimento 1: La carga líquida (agua del grifo sedimentada) se colocó en la cámara del reactor de acuerdo con la séptima realización de la presente invención, de manera que la superficie del agua estaba aproximadamente 20 mm por encima de la punta de salida de la bocina Barbell. La potencia acústica medida depositada en el agua durante el funcionamiento del reactor fue de 996 W. En este caso, la zona de cavitación se formó casi por completo en la punta de salida de la bocina, como se muestra en la figura 7.

Experimento 2: La carga líquida (agua del grifo sedimentada) se colocó en la cámara del reactor de acuerdo con la octava realización de la presente invención, de manera que la superficie del agua llegara a la válvula de salida. Por lo tanto, la cámara del reactor se llenó completamente con el líquido. La potencia acústica medida depositada en el agua durante el funcionamiento del reactor fue de 1295 W. El aumento de la energía acústica absorbida en comparación con el Experimento 1 se debió a la presencia de una zona de cavitación superior adicional en la parte estrecha de la bocina Barbell, como se muestra en la figura 8.

Experimento 3: La carga líquida (agua del grifo sedimentada) se colocó en la cámara del reactor de acuerdo con la novena realización de la presente invención, de manera que la superficie del agua llegara a la válvula de salida. Por lo tanto, la cámara del reactor se llenó completamente con el líquido. La potencia acústica medida depositada en el agua durante el funcionamiento del reactor fue de 1554 W. El aumento en la energía acústica absorbida en comparación con el Experimento 2 se debió a la presencia de un inserto de cono en el fondo de la cámara del reactor, que optimizó el volumen y la forma de la zona de cavitación principal en la punta de salida de la bocina Barbell.

Realización 10 - (que no forma parte de la invención) Reactor ultrasónico basado en un dispositivo Barbell largo, tal como la bocina Barbell larga, bocina Barbell larga catenoidal o un Conjunto de bocina Barbell larga correspondiente

La figura 12 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en un dispositivo Barbell largo, tal como la bocina Barbell larga, bocina Barbell larga catenoidal o un Conjunto de bocina Barbell larga correspondiente, de acuerdo con la décima realización de la presente invención. El reactor está equipado con dos superficies de reflexión circulares y un inserto en la parte inferior, con forma de cono circular invertido. El reactor comprende un transductor electroacústico 81, un dispositivo Barbell largo 82, una cámara del reactor 83, un inserto de cono circular invertido 84, una válvula 85, superficies de reflexión circulares 86 y una válvula 87.

Realizaciones 11 y 12 - (que no forman parte de la invención) dos versiones de reactores ultrasónicos basados en bocinas Barbell extendidas o Conjuntos de bocina Barbell con transductor extendido

Las figuras 13 y 14 son dos versiones de reactores ultrasónicos de flujo a través basados en bocinas Barbell extendidas o conjuntos de bocina Barbell con transductor extendido, de acuerdo con las realizaciones undécima y duodécima de la presente invención. Los reactores están equipados con superficies de reflexión circulares e insertos en la parte inferior, en forma de conos circulares invertidos. El reactor de la figura 13 comprende un transductor electroacústico 91, una bocina Barbell extendida o un conjunto de bocina Barbell con transductor extendido 92, una cámara del reactor 93, un inserto de cono circular invertido 94, una válvula 95, una primera superficie de reflexión circular 96, una segunda superficie de reflexión circular 97 y una válvula 98. El reactor de la figura 14 comprende un transductor electroacústico 101, una bocina Barbell extendida o un conjunto de bocina Barbell con transductor extendido 102, una cámara del reactor 103, un inserto de cono circular invertido 104, una válvula 105, una superficie de reflexión circular 107 y una válvula 108.

Realizaciones 13, 14 y 15 - (que no forman parte de la invención) Reactores ultrasónicos basados en bocinas Barbell huecas o Conjuntos de bocina Barbell con transductor hueco

La figura 15 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell hueca o un conjunto de bocina Barbell con transductor hueco con una región hueca interna corta, de acuerdo con la decimotercera realización de la presente invención. La longitud de la región hueca es menor o igual a la longitud del elemento de salida cilíndrico del dispositivo. El reactor comprende un transductor electroacústico 111, una bocina Barbell hueca o un conjunto de bocina Barbell con transductor hueco 112, una superficie de reflexión circular 113, una cámara del reactor 114, una válvula 115 y una válvula 116. La carga líquida se suministra cerca de la parte superior de la región hueca al campo de cavitación formado dentro de la región hueca.

Resultados experimentales que ilustran la realización 13

Se calculó y construyó una bocina Barbell hueca de aleación de titanio con una región hueca interna corta de acuerdo con las ecuaciones proporcionadas en la patente de EE. UU. n.º 7.156.201 y en la publicación S.L. Peshkovski, A.S. Peshkovski, Ultrason. Sonochem. 14 (2007) 314. La región hueca interna de la bocina era un cono circular recto con una punta afilada. La bocina construida tenía los siguientes parámetros: Diámetro exterior de salida - 60 mm, diámetro interior de salida - 50 mm, profundidad de la región hueca interna - 60 mm, amplitud de vibración de salida - 25 micras (rms), frecuencia ultrasónica - 20 kHz, velocidad de oscilación de salida - 314 cm/s (rms). El área superficial total de la región hueca interna fue de 51 cm².

La carga líquida (agua del grifo sedimentada) se colocó en la cámara del reactor de acuerdo con la decimotercera realización de la presente invención, de manera que la superficie del agua llegara a la válvula de salida. Por lo tanto, la cámara del reactor se llenó completamente con el líquido. La cámara del reactor estaba equipada con paredes termoaisladas con un sensor de calor incorporado. La potencia acústica medida depositada en el agua durante el funcionamiento del reactor fue de 1709 W. Este ejemplo muestra que el uso de la bocina Barbell hueca en una cámara adecuada del reactor ultrasónico permite lograr un aumento adicional en la energía acústica depositada en la zona de cavitación activa en la cámara del reactor, aumentando así la eficacia tecnológica del reactor.

La figura 16 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell hueca con una región hueca interna larga, de acuerdo con la decimocuarta realización de la presente invención. La longitud de la región hueca es menor o igual a las longitudes combinadas del elemento de salida cilíndrico de la bocina y su elemento adyacente con sección transversal variable. El reactor comprende un transductor electroacústico 121, una bocina Barbell hueca o un conjunto de bocina Barbell con transductor hueco 122, una válvula 123, una cámara del reactor 124, una válvula 125 y una superficie de reflexión circular 126. El líquido se suministra cerca de la parte superior de la región hueca al campo de cavitación formado dentro de la región hueca.

La figura 17 es otra versión de un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell hueca o un conjunto de bocina Barbell con transductor hueco con una región hueca interna larga, de acuerdo con la decimoquinta realización de la presente invención. La cámara del reactor se modifica de manera que todo el líquido se dirija a la zona de cavitación de mayor intensidad. Preferentemente se utiliza una colocación invertida del reactor. El reactor comprende una cámara del reactor 131, una bocina Barbell hueca o un conjunto de bocina Barbell con transductor hueco 132, una válvula 133, una válvula 134 y un transductor electroacústico 135. El líquido se suministra cerca de la parte superior de la región hueca al campo de cavitación formado dentro de la región hueca.

Realización 16 - (que no forma parte de la invención) Reactor ultrasónico basado en una bocina Barbell hueca o un Conjunto de bocina Barbell con transductor hueco y una bocina ultrasónica genérica de diseño arbitrario.

La figura 18 es un reactor ultrasónico de flujo a través basado en una bocina Barbell hueca (o conjunto de bocina Barbell con transductor hueco) y una bocina genérica de diseño arbitrario, de acuerdo con la decimosexta realización de la presente invención, donde el reactor comprende transductores electroacústicos 141 y 144, una bocina Barbell hueca o conjunto de bocina Barbell con transductor hueco 142, una bocina ultrasónica genérica 143 y una cámara del reactor 145. Las bocinas están dispuestas de manera que la bocina genérica encaje dentro de la bocina Barbell hueca (o conjunto de bocina Barbell con transductor hueco). Las bocinas funcionan en fase, aumentando así la

intensidad del campo de cavitación.

Realización 17 - (que no forma parte de la invención) Extrusora ultrasónica para el procesamiento de polímeros fundidos

5 En general, se piensa que la cavitación acústica solo puede ocurrir en líquidos de baja viscosidad. En consecuencia, los estudios previos de los efectos de la cavitación en compuestos de alto peso molecular (tal como los polímeros) se limitan a los realizados en soluciones de baja viscosidad de tales compuestos. Muchos de estos estudios muestran que la cavitación ultrasónica provoca transformaciones físicas y químicas significativas en tales polímeros,
10 que pueden ser muy útiles para su procesamiento. Estos estudios, sin embargo, son en su mayoría de interés académico porque el procesamiento de soluciones de polímeros débiles es tecnológicamente muy ineficiente. El impacto industrial de tales estudios, por lo tanto, fue severamente limitado.

15 Una publicación (ML Friedman y SL Peshkovsky, Molding of Polymers under Conditions of Vibration Effects, Advances in Polymer Science, Polymer Processing, NY, 1990, p 41-79), sin embargo, muestra evidencia experimental de que los fluidos viscoelásticos, tal como el polímero fundido con viscosidad del orden de $10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, también puede sufrir cavitación, como resultado de lo cual se crean nubes de regiones de cavitación activa. Este fenómeno está relacionado con la presencia no solo de la alta viscosidad, sino también de la elasticidad en estos compuestos. La figura 22 y la figura 23 muestran fotografías de tales regiones de nubes de cavitación en la masa
20 fundida estacionaria y fluida de poliisobutileno, respectivamente. Basándose en estas observaciones, en la presente invención se ha determinado que una extrusora de polímeros diseñada apropiadamente con un reactor ultrasónico adecuado equipado con una bocina Barbell puede ser muy útil para la industria de procesamiento de polímeros.

25 La figura 19 es un esquema de una Extrusora ultrasónica para el tratamiento de polímeros fundidos de alta viscosidad con ultrasonidos de alta intensidad, de acuerdo con la decimoséptima realización de la presente invención. La Extrusora ultrasónica comprende una extrusora de polímero 151, una cámara del reactor 152, un dispositivo Barbell 153 y un transductor electroacústico 154.

30 La figura 20 es una vista ampliada de un cabezal de reactor ultrasónico de flujo a través para una extrusora ultrasónica 160, que comprende un transductor electroacústico 161, un dispositivo Barbell 162, un elemento de calentamiento 163, una cámara del reactor 164, un cabezal moldeador 165 y un cuerpo de extrusora de polímero 166. El polímero fundido de la extrusora 160 se dirige bajo presión al cabezal del reactor ultrasónico equipado con una unidad de control de temperatura. En el cabezal del reactor ultrasónico, el polímero fundido fluye hacia el espacio entre el cabezal moldeador y el dispositivo Barbell, donde queda expuesto a vibraciones ultrasónicas
35 excitadas por un transductor electroacústico. Durante el tratamiento ultrasónico de alta intensidad, las propiedades físicas/químicas de los polímeros cambian, junto con sus estructuras moleculares. Pueden tener lugar diversas reacciones químicas, copolimerización, desvulcanización, agregación de cadenas laterales y otras modificaciones.

40 La figura 21 es un esquema de un dispositivo para el tratamiento de polímeros fundidos de alta viscosidad con ultrasonidos de alta intensidad, basado en el principio de extrusión en cascada. El reactor comprende una primera extrusora de polímero 171, un transductor electroacústico 172, un dispositivo Barbell 173, una cámara del reactor 174, una segunda extrusora de polímero 175 y un cabezal moldeador 176.

45 *Realización 18 - (que no forma parte de la invención) Reactor ultrasónico basado en un dispositivo Barbell no metálico*

En la decimoctava realización de la presente invención, el reactor ultrasónico de flujo a través está diseñado para ser adecuado para el procesamiento de líquidos químicamente agresivos, compuestos de pureza extremadamente alta, así como para funcionamiento en campos electromagnéticos, magnéticos, eléctricos, de microondas, etc., en los que el uso de objetos metálicos es indeseable o imposible. La radiación ultrasónica en un reactor de este tipo se realiza
50 usando un dispositivo Barbell (posiblemente con un radiador de guía de ondas adicional conectado acústicamente de forma rígida) hecho de un material no metálico, tal como material de corindón técnico, Al₂O₃ (por ejemplo, zafiro, leucozafiro, rubí, etc.).

REIVINDICACIONES

1. Un radiador de guía de ondas ultrasónicas que tiene una longitud total formada a partir de un material predeterminado, que comprende:

5 una primera sección cilíndrica que tiene un primer diámetro y una primera longitud, y que incluye una superficie de entrada que tiene un área de sección transversal de entrada;
 una primera sección de transición acoplada acústicamente a la primera sección cilíndrica y que tiene una forma catenoidal decreciente desde dicho primer diámetro a un segundo diámetro sobre una primera longitud de
 10 transición;
 una segunda sección cilíndrica acoplada acústicamente a la primera sección de transición y que tiene dicho segundo diámetro y una segunda longitud;
 una segunda sección de transición acoplada acústicamente a la segunda sección cilíndrica y que tiene una segunda sección transversal variable que aumenta desde dicho segundo diámetro a un tercer diámetro sobre
 15 una segunda longitud de transición;
 una tercera sección cilíndrica acoplada acústicamente a la segunda sección de transición y que tiene dicho tercer diámetro y una tercera longitud, y que incluye una superficie de salida que tiene un área de sección transversal de salida;
 en donde la longitud total es igual a un múltiplo de la mitad de la longitud de onda acústica en el material predeterminado que representa la dispersión de la velocidad de fase;
 20 **caracterizado por que** la longitud de dicha primera sección de transición es inferior al valor de $\text{Log}(N)/k$, donde N es la relación de los diámetros primero y segundo de las secciones cilíndricas primera y segunda, respectivamente, y k es el número de onda que representa la frecuencia angular de las vibraciones ultrasónicas dividido por la velocidad del sonido en el material predeterminado.

25 2. El radiador de guía de ondas de la reivindicación 1, en donde la tercera sección cilíndrica está modelada.

3. El radiador de guía de ondas de la reivindicación 1, en donde dicho radiador de guía de ondas comprende un material no metálico.

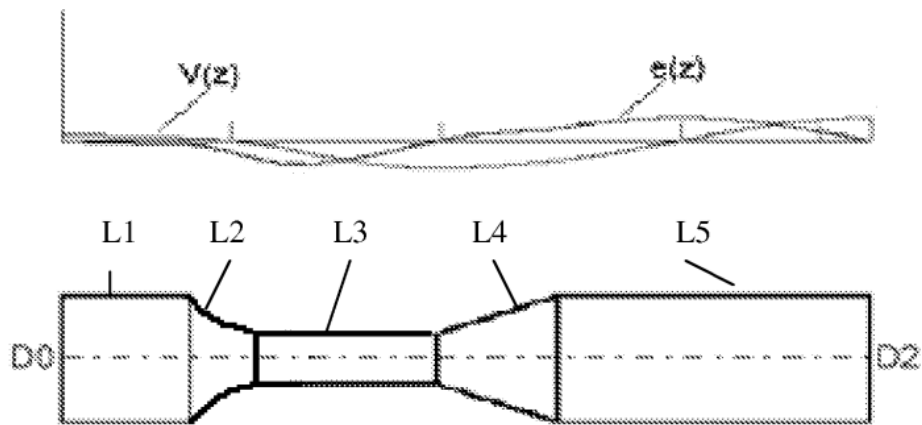


Figura 1

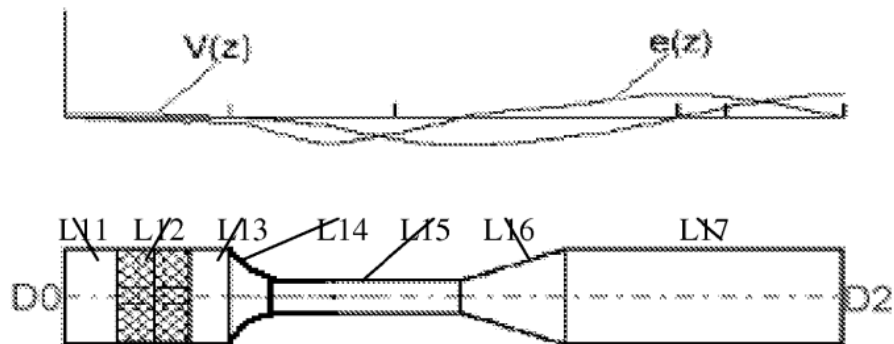


Figura 2

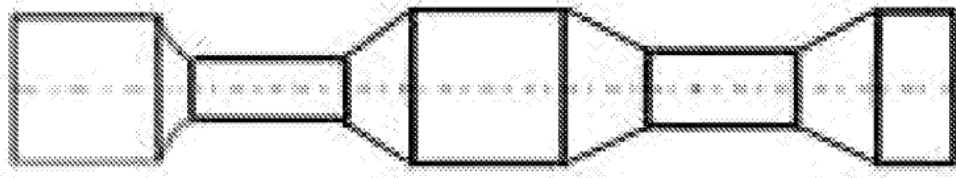


Figura 3

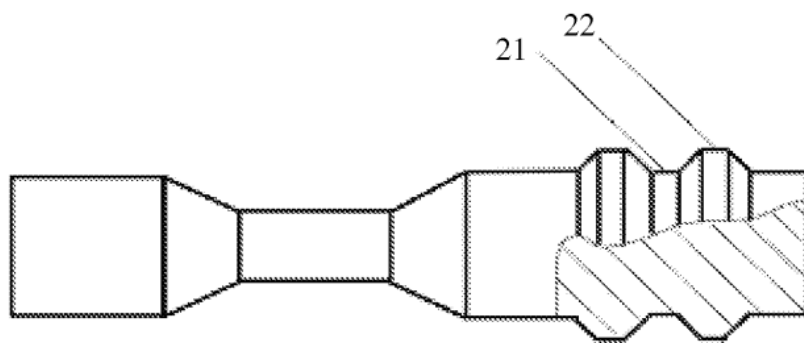


Figura 4

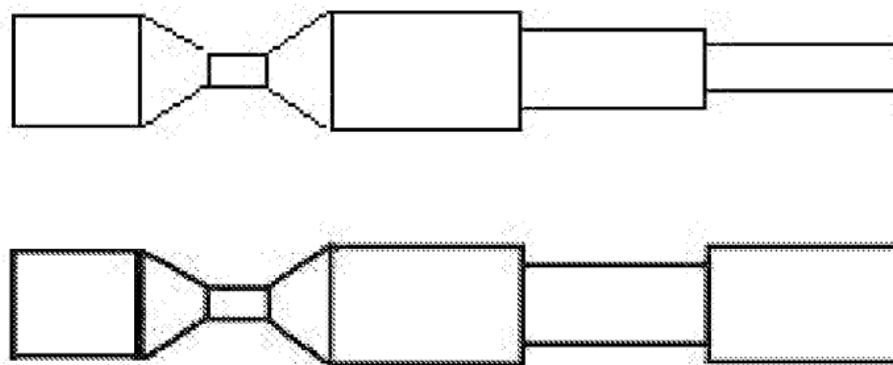


Figura 5

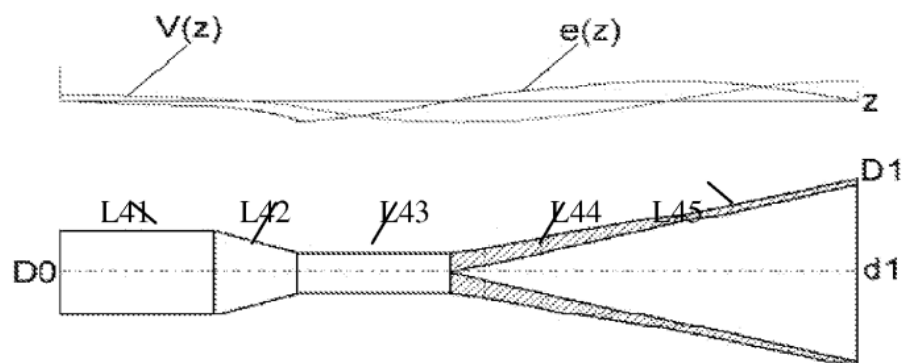


Figura 6



Figura 7

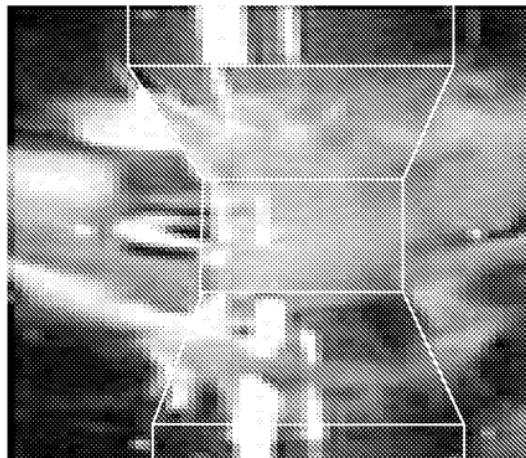


Figura 8

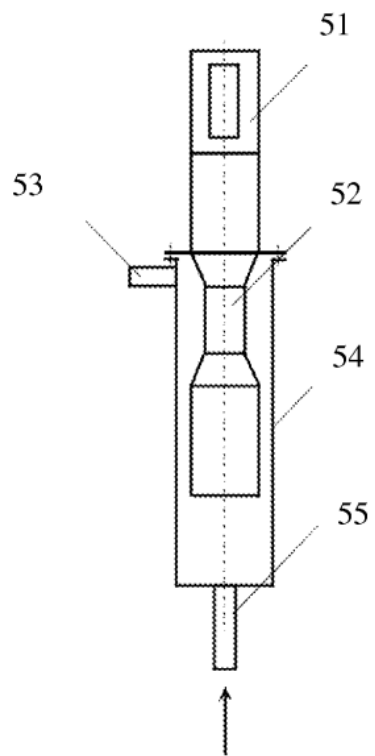


Figura 9

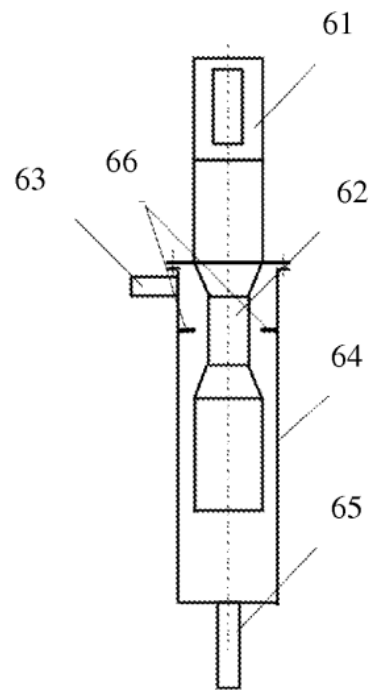


Figura 10

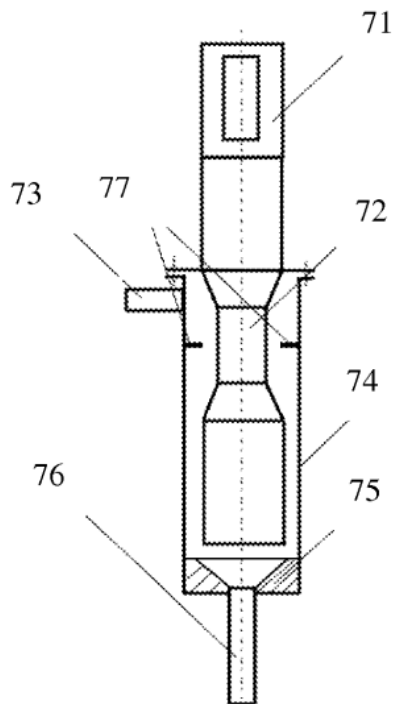


Figura 11

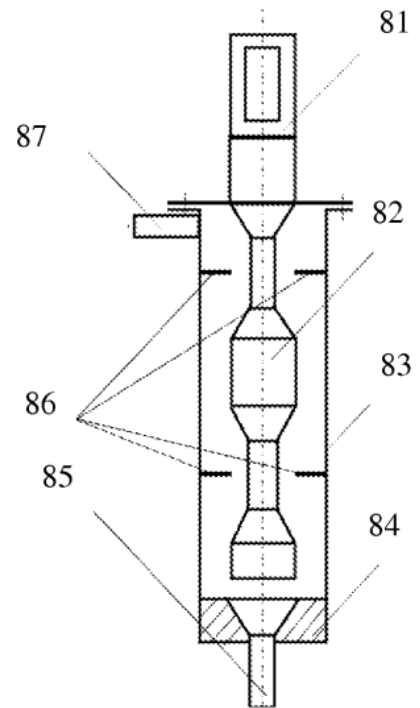


Figura 12

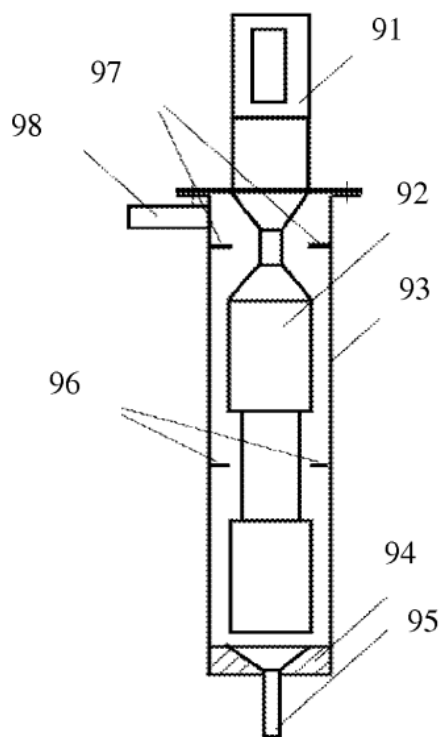


Figura 13

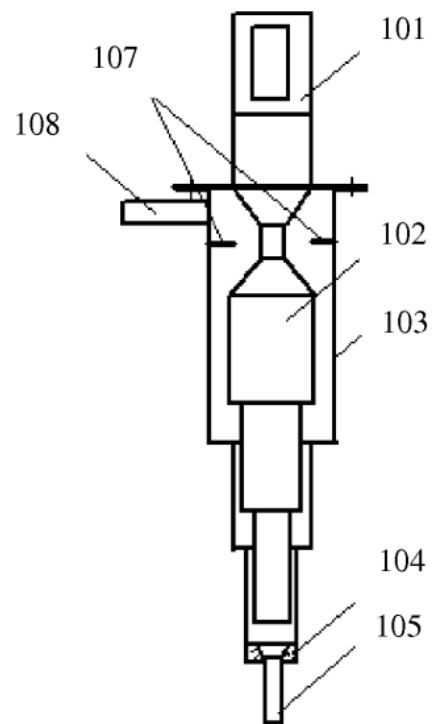


Figura 14

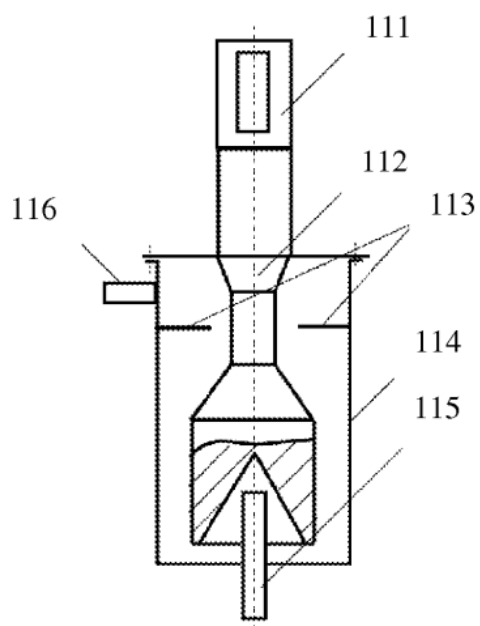


Figura 15

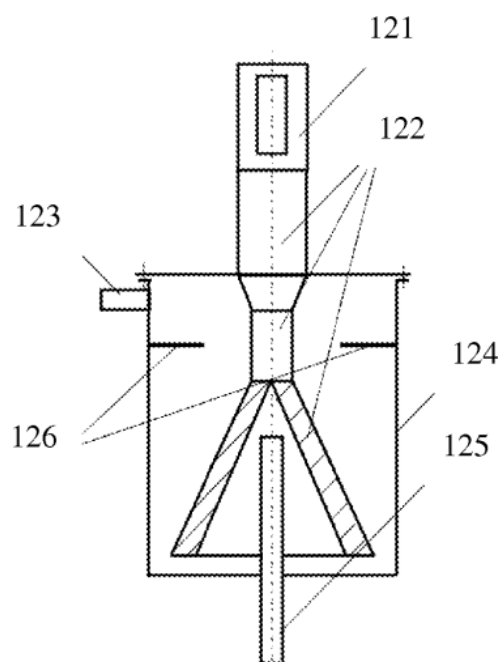


Figura 16

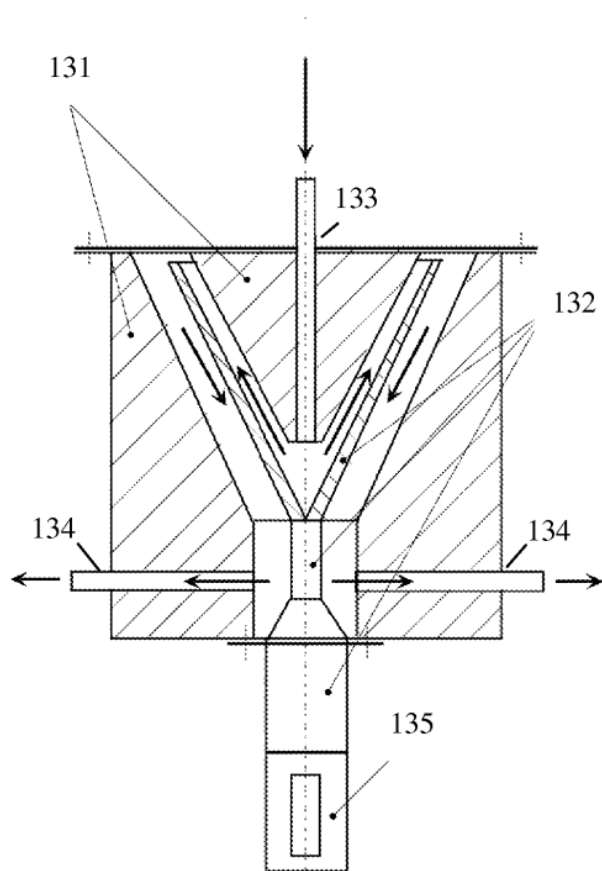


Figura 17

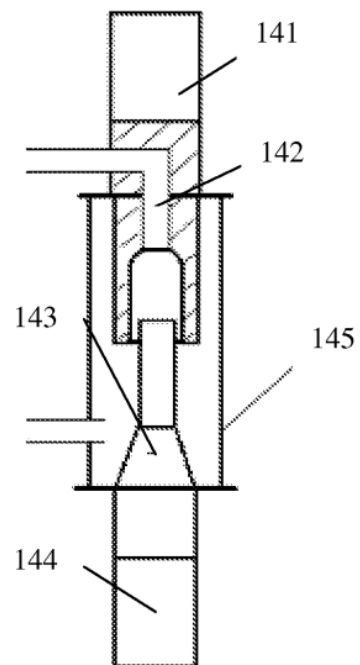


Figura 18

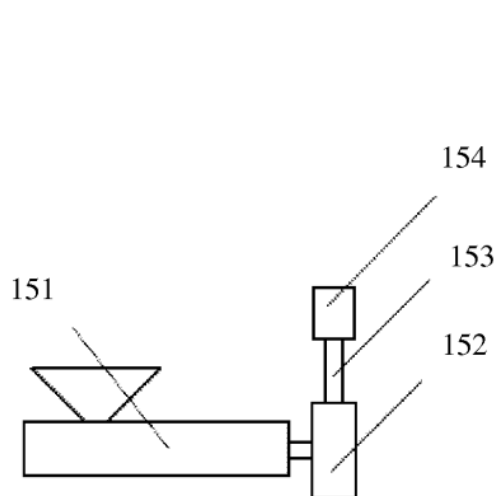


Figura 19

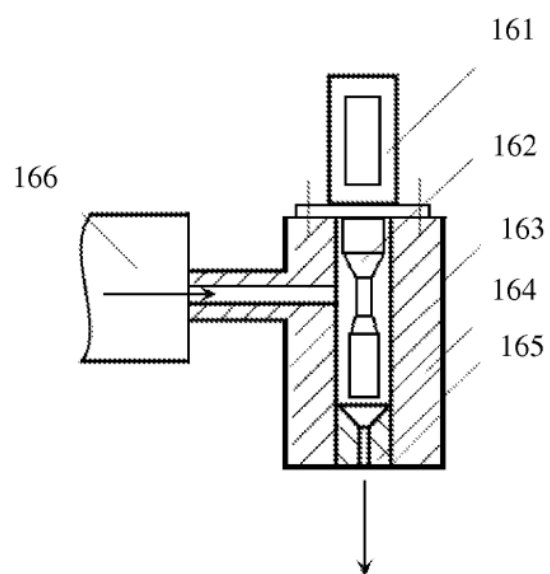


Figura 20

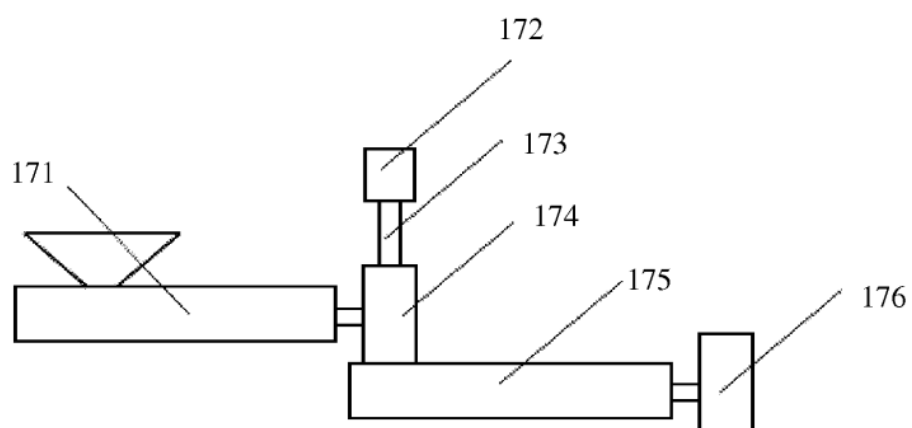


Figura 21

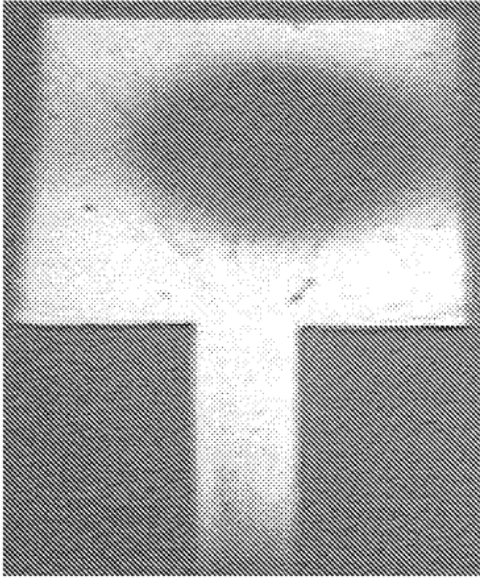


Figura 22

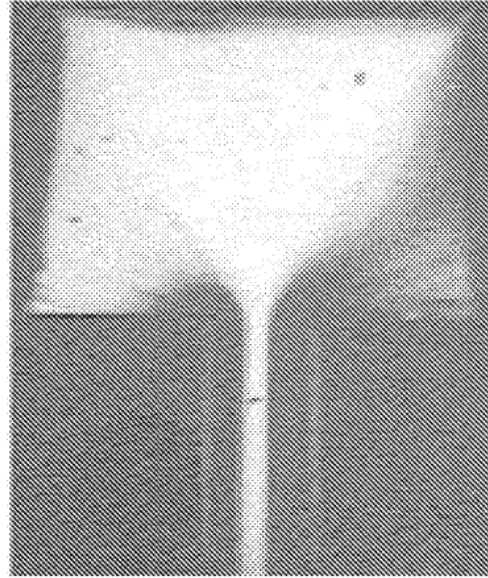


Figura 23