

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 806 697**

51 Int. Cl.:

C01B 3/38

(2006.01)

B01J 8/06

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.10.2017** **PCT/EP2017/077345**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.05.2018** **WO18077969**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.10.2017** **E 17787207 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.07.2020** **EP 3532430**

54 Título: **Tubo catalizador para reformado**

30 Prioridad:

25.10.2016 EP 16195490

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

18.02.2021

73 Titular/es:

TECHNIP FRANCE (100.0%)
6-8 Allee De L'Arche Faubourg De L'Arche
92400 Courbevoie, FR

72 Inventor/es:

FARACE, ANTONIO y
WALSPURGER, STEPHANE

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 806 697 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

Tubo catalizador para reformado

5 La invención está dirigida a un tubo catalizador, un reactor multitubular, tal como un reformador con vapor, que comprende al menos uno de tales tubos catalizadores y a un método para llevar a cabo un proceso catalítico tal como el reformado con vapor.

10 Se conoce que se realizan procesos catalíticos en reactores multitubulares. Un ejemplo bien conocido es el proceso catalítico de reformado con vapor.

15 El reformado con vapor es un proceso catalítico, en donde una materia prima de hidrocarburos (gas de alimentación) se convierte en una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno gaseoso (llamado gas del proceso) en presencia de un catalizador a base de metal, típicamente níquel. La reacción de conversión es fuertemente endotérmica y debe realizarse a altas temperaturas, típicamente al menos a 700 °C.

20 La conversión catalítica del gas del proceso puede llevarse a cabo en un reactor multitubular de un horno industrial o en un calentador de combustión. Por ejemplo, el reformado con vapor se realiza en un reformador con vapor. Un calentador de combustión u horno industrial (tal como un reformador con vapor) tiene esencialmente dos secciones principales: el horno (sección radiante) y el sistema de recuperación de calor (sección de convección). La sección radiante comprende una cámara del horno con quemadores, que puede colocarse en el techo (horno de combustión superior), en el piso (horno de combustión inferior) y/o en la superficie lateral (horno de combustión lateral) de la cámara del horno. Los quemadores producen el calor necesario por combustión de combustible. La sección radiante comprende además múltiples tubos, en donde se carga el catalizador, para permitir un suministro de calor suficiente al catalizador para que 25 tenga lugar la reacción catalítica endotérmica. Los tubos en la sección radiante en donde tiene lugar la reacción de conversión se denominan tubos catalizadores. Múltiples tubos catalizadores se insertan típicamente en la sección radiante. La sección de convección contiene varios intercambiadores de calor para recuperar el calor. El gas de combustión caliente que sale de la sección radiante pasa a través de estos intercambiadores de calor, que típicamente se usan para precalentar la materia prima, calentar el agua y producir vapor.

30 La salida de los tubos cargados del catalizador es la zona donde el gas del proceso alcanza su temperatura más alta en todo el proceso de conversión catalítica, típicamente por encima de 880 °C, hasta 950-980 °C. En consecuencia, el gas del proceso que sale de la sección catalizadora de los tubos catalizadores puede considerarse como una valiosa fuente de calor de alta energía.

35 Tradicionalmente en los reformadores con vapor, el gas del proceso que sale de los tubos catalizadores se enruta a través de cabezales y líneas de transferencia a una caldera en donde el gas del proceso se enfría desde más de 880 °C (típicamente 880-950 °C) a una temperatura inferior a 350 °C, produciendo de esta manera vapor de alta calidad. Este vapor puede usarse como vapor del proceso para la reacción del reformado con vapor, exportar el vapor para la unidad 40 de producción circundante o incluso producir energía. Sin embargo, una desventaja de producir vapor de esta manera es que no es la forma más eficiente de reciclar el calor del gas del proceso a alta temperatura.

45 El gas del proceso que sale de los tubos catalizadores también puede usarse como fuente de calor para la reacción de reformado. Este proceso puede denominarse además conversión catalítica regenerativa, ya que usa parte del calor de alto valor que contiene el gas del proceso al salir de la zona catalítica para proporcionar parte del calor de reacción. En la conversión catalítica regenerativa, el intercambio de calor tiene lugar entre el gas del proceso caliente que sale de la zona catalítica de los tubos catalizadores y el gas del proceso que se convierte en la parte aguas arriba de la zona catalítica. Esta estrategia puede usarse ventajosamente para disminuir el suministro de calor externo (a través de la combustión de combustible y gas residual en la caja de fuego), para aumentar la eficiencia de la caja de fuego y para reducir el costo del 50 equipo de intercambio de calor necesario para la recuperación del calor en la salida del reformador y en la sección de convección. Un ejemplo del proceso de conversión catalítica regenerativa en el reformado se conoce, por ejemplo, del documento WO 2011/088982. En este caso, el proceso se conoce como reformado regenerativo.

55 Pueden distinguirse dos tipos generales de reformadores con vapor con respecto a la forma en que las entradas y salidas del tubo catalizador están orientadas en la cámara del horno.

60 En los reformadores con vapor del primer tipo (tipo 1), tanto las entradas del gas del proceso como las salidas del gas del proceso de los tubos catalizadores están ubicadas en el mismo lado del horno. Cada tubo catalizador se inserta en la cámara del horno, de manera que se extiende a través de una sola pared del horno. El gas entrará en la cámara del horno a través de la pared de la cámara de un horno, fluirá a través de la cámara del horno y luego regresará a la misma pared del horno y saldrá de la cámara del horno nuevamente. Generalmente, los tubos catalizadores están diseñados de manera que el gas del proceso fluye en una trayectoria en forma de U a través de la cámara del horno. Un ejemplo de este tipo de reformador con vapor se da por ejemplo en el documento EP 2 223 739 A1.

65 En los reformadores con vapor del segundo tipo (tipo 2), las entradas del tubo catalizador están ubicadas en un extremo de la cámara del horno, mientras que las salidas del tubo catalizador están ubicadas en el otro extremo opuesto de la

cámara del horno. En los reformadores del tipo 2, los tubos catalizadores se insertan en la cámara del horno de manera que se extienden a través de dos paredes opuestas del horno. Generalmente, los tubos catalizadores están diseñados como tubos alargados rectos, de manera que el gas fluye a través de la cámara del horno de un extremo al otro en una trayectoria relativamente recta. Un ejemplo de este tipo de reformador con vapor se da por ejemplo en el documento WO 2014/040815.

La diferencia en el diseño del tubo catalizador descrito anteriormente es un resultado directo de la diferencia en el diseño general de los dos tipos de reformadores con vapor. Como tal, no es posible renovar un reformador con vapor de un tipo para que se ajuste a los tubos catalizadores diseñados para el otro tipo. De manera similar, los tubos catalizadores diseñados para reformadores con vapor del primer tipo no pueden usarse ni renovarse para su uso en reformadores con vapor del otro tipo.

Se sabe que aplica el concepto de reforma regenerativa en reformadores con vapor del tipo 1. Para este propósito, se realizó un diseño de tubo específico en base a reactores de tubo de Campo (también conocido como tubo de Bayoneta). En este diseño, el tubo catalizador consiste en un tubo exterior que está cerrado en un extremo externo y además un tubo interior (5,15) que está abierto en ambos extremos externos, cuyo tubo interior (5,15) se recibe coaxialmente en el tubo exterior. Este diseño se describe, por ejemplo, en los documentos WO 00/27518, WO 95/11745 y US 2014/0196875. El diseño se basa en el tubo en un concepto de tubo donde un arreglo anular del reactor permite el intercambio de calor entre el gas del proceso caliente que sale del lecho catalítico y el gas del proceso que se convierte en la parte aguas arriba del lecho catalítico.

Aunque se han hecho intentos para aplicar el concepto de reforma regenerativa en reformadores con vapor del tipo 2 mediante el uso del diseño tradicional anterior, el éxito ha sido limitado y no se ha aplicado ampliamente. Además, no ha sido posible renovar los reformadores con vapor existentes para implementar esta tecnología, a menos que todo el sistema de entrada/salida también se renueve de manera que las entradas y salidas estén ubicadas en el mismo lado (en consecuencia, la renovación efectiva del reformador con vapor del tipo 2 en un reformador con vapor del tipo 1, que es una renovación muy drástica y compleja).

En consecuencia, un objeto de la invención es aplicar el concepto de reforma regenerativa en reformadores con vapor del tipo 2. En particular, es un objeto de la invención aplicar el concepto de reforma regenerativa en reformadores con vapor del tipo 2 ya existentes.

Un objeto adicional de la invención es proporcionar un tubo catalizador en el que el catalizador pueda cambiarse y/o reemplazarse fácilmente durante el tiempo de inactividad del reformador con vapor.

Un objeto adicional de la invención es proporcionar un tubo catalizador que tenga buena resistencia a la expansión diferencial.

Un objeto adicional de la invención es proporcionar un tubo catalizador en donde parámetros tal como la temperatura y la presión puedan medirse fácilmente sin alterar la hidrodinámica en la zona catalítica.

Al menos uno de estos objetivos se ha cumplido proporcionando un tubo catalizador para su uso en un calentador de combustión u horno industrial (*por ejemplo* para usar en un reformador, preferentemente un reformador con vapor) que comprende

- una entrada del tubo catalizador para que el gas del proceso entre en el tubo catalizador y una salida del tubo catalizador para que el gas del proceso salga del tubo catalizador, cuya entrada y salida se encuentran en los extremos opuestos del tubo catalizador;
- un tubo exterior del reactor (1,11);
- un tubo interior (5,15) que se extiende coaxialmente dentro del tubo exterior del reactor (1,11);
- una frontera (3,13) ubicada entre la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11) y la pared externa del tubo interior (5,15);
- un primer canal anular para convertir catalíticamente el gas del proceso, cuyo canal está definido por la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11) y la pared externa de la frontera (3,13), cuyo canal que está cargado con material catalizador;
- un segundo canal anular para que el gas del proceso fluya en contracorriente o en el mismo sentido al gas del proceso que fluye a través del primer canal anular, cuyo segundo canal anular está definido por la pared interna de la frontera (3,13) y la pared externa del tubo interior (5,15);
- una barrera de entrada (4,14) en el extremo de la entrada del tubo catalizador para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el segundo canal anular y desde el tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador;
- una barrera de salida (6,16) en el extremo de la salida del tubo catalizador para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el primer canal anular y desde uno de los segundos canales anulares y desde el tubo interior (5,15), mientras permite que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el otro del segundo canal anular y desde el tubo interior (5,15);

en donde el tubo interior, el primer canal anular y el segundo canal anular tienen cada uno una abertura en el lado de la entrada del tubo catalizador y una abertura en el lado de la salida del tubo catalizador, en donde la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del primer canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador; la abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador o con la abertura del tubo interior en el extremo de la salida del tubo catalizador; la abertura del segundo canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador; y o bien la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la salida del tubo catalizador o la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la salida del tubo catalizador.

Los inventores descubrieron que al proporcionar un nuevo diseño para los tubos catalizadores, es posible aplicar el concepto de reforma regenerativa en reformadores con vapor del tipo 2 sin tener que renovar otras partes del reformador con vapor. Además, la frontera (3,13) proporciona a los componentes internos del tubo catalizador una mayor resistencia a la expansión diferencial, ya que este elemento puede expandirse libremente.

Un aspecto importante de hacer un nuevo diseño para un tubo catalizador es que debe lograrse un equilibrio correcto entre la actividad del catalizador en la zona catalítica (en el primer canal anular), la caída de presión en los diferentes canales (que determina en parte la velocidad del flujo de gas del proceso a través de los canales) y asegurarse un intercambio de calor adecuado entre los canales. Los inventores descubrieron que la presencia del tubo interior (5,15) proporciona un medio para ajustar las condiciones del flujo en el segundo canal anular, de manera que se obtiene un intercambio de calor eficiente entre el primer y el segundo canal anular.

Una ventaja adicional de realizar un reformado regenerativo mediante el uso de un flujo en dos canales anulares es que tal configuración permite una alta velocidad del gas del proceso a través de los canales. Una velocidad tan alta puede mejorar la velocidad de transferencia de calor y, en consecuencia, la eficiencia del intercambio de calor entre los flujos de gas del primer y del segundo canal anular.

Los inventores se dieron cuenta además de que debido al descubrimiento de catalizadores mejorados en los últimos años, el volumen de catalizador requerido en los tubos catalizadores ya no representa una restricción insuperable en el diseño del tubo catalizador. Por consiguiente, un primer canal anular como se definió anteriormente fue capaz de proporcionar una zona catalítica suficientemente grande para llevar a cabo la reacción del reformado.

Teniendo en cuenta lo anterior, los inventores descubrieron que una configuración en donde el tubo catalizador comprende un tubo interior (5,15) (para que el gas del proceso salga del tubo catalizador y para mejorar el intercambio de calor) y dos canales anulares separados por una frontera (3,13) (uno para retener el catalizador, el otro para proporcionar calor a la zona catalítica) puede proporcionar una buena combinación de la actividad catalítica, el intercambio de calor y la caída de presión aceptable. Se descubrió que este era incluso el caso cuando tenía que usar las dimensiones de los insertos de tubos catalizadores de los reformadores con vapor existentes, lo que hacía posible en consecuencia renovar tales reformadores con vapor.

Aunque la invención se ilustra y se ejemplifica en la presente descripción con respecto a los reactores reformadores y al proceso de reformado con vapor, el tubo del reactor de la invención también puede usarse en otros tipos de reactores multitubulares y procesos catalíticos. Los procesos catalíticos distintos del reformado también pueden beneficiarse de la configuración de los tubos catalíticos de la invención, porque la configuración específica permite el intercambio de calor entre el gas del proceso caliente que sale de la zona catalítica de los tubos catalizadores y el gas del proceso que se convierte en la parte aguas arriba de la zona catalítica. En consecuencia, el gas del proceso que sale de la zona catalítica del tubo catalizador puede usarse como fuente de calor para la reacción catalítica. Tal proceso catalítico se llama conversión catalítica regenerativa. Esto es ventajoso para cualquier proceso catalítico que se realice en un tubo catalizador en un calentador de combustión u horno industrial. Tal proceso catalítico se realiza típicamente a altas temperaturas de *por ejemplo* al menos 400 °C o al menos 500 °C. Preferentemente, el calentador de combustión u horno industrial es un reformador, aún con mayor preferencia un reformador con vapor.

La figura 1 muestra una modalidad del tubo catalizador de acuerdo con la primera configuración base de la invención. La dirección en la que fluye el gas del proceso durante el funcionamiento del reformador con vapor se indica con flechas.

La figura 2 muestra una sección transversal de un tubo catalizador de acuerdo con la invención. La sección transversal se toma perpendicular al eje longitudinal del tubo catalizador.

La figura 3 muestra una modalidad del tubo catalizador de acuerdo con la primera configuración base de la invención, en donde el tubo interior se extiende a través de la barrera de salida. La dirección en la que fluye el gas del proceso durante el funcionamiento del reformador con vapor se indica con flechas.

La figura 4 muestra una modalidad del tubo catalizador de acuerdo con la segunda configuración base de la invención (derecha). La dirección en la que fluye el gas del proceso durante el funcionamiento del reformador con vapor se indica con flechas. En el lado izquierdo de la figura 4, se proporciona una posible sección transversal del tubo catalizador.

La figura 5 muestra las secciones transversales de algunos posibles tubos catalizadores de acuerdo con la invención. La sección transversal se toma perpendicular al eje longitudinal del tubo catalizador.

5 El término "canal anular", como se usa en la presente, se refiere al canal externo formado al colocar un primer tubo o cuerpo similar a un tubo coaxialmente dentro de un segundo tubo o cuerpo similar a un tubo. La forma del canal está así determinada por la forma de la pared externa del primer tubo o cuerpo similar a un tubo (que es la frontera en el caso del primer canal anular; y el tubo interior en el caso del segundo canal anular) y por la forma de la pared interna del segundo tubo o cuerpo en forma de tubo (que es el tubo catalizador en el caso del primer canal anular y la frontera en el caso del segundo canal anular). En el caso de dos tubos redondos, la sección transversal del canal anular tendrá la forma de un anillo circular. Sin embargo, como se describe a continuación, la sección transversal del tubo interior y de la frontera no necesita ser circular. En consecuencia, el canal anular puede tener varias formas. Estas formas también pueden variar a lo largo de la longitud del tubo catalizador.

15 Por conveniencia, el término "gas del proceso", como se usa en la presente, puede referirse al gas en el reactor en cualquier etapa, es decir, tanto al gas que ingresa a la entrada del tubo del reactor, como al gas que pasa a través del primer y del segundo canal anular, al gas que pasa a través del tubo interior y al gas que sale del reactor a través de la salida del tubo. Sin embargo, más exactamente, el término "gas de alimentación" puede usarse para referirse al gas que ingresa a la entrada del tubo del reactor antes de la zona del catalizador, mientras se usa el término "gas del proceso" para el gas que ha sido (parcial o totalmente) convertido por el catalizador.

El tubo catalizador es adecuado para la conversión catalítica regenerativa en general. En particular, el tubo catalizador está diseñado para el reformado con vapor regenerativo. En el caso del reformado con vapor, el tubo catalizador es un tubo reformador.

25 La configuración descrita anteriormente para el tubo catalizador, con el tubo interior (5,15) ubicado dentro del tubo exterior del reactor (1,11) con una frontera (3,13) entre los dos tubos, proporciona el tubo catalizador de la invención con esencialmente tres canales (es decir, el primer canal anular, el segundo canal anular y el tubo interior (5,15)), con cada uno de los canales con dos aberturas (es decir, una en el extremo de la entrada del tubo catalizador y otra en el extremo de la salida del tubo catalizador).

La barrera de entrada y salida (6,16) proporciona los tres canales en el tubo catalizador (es decir, el primer y segundo canal anular y el tubo interior) para conectarse entre sí de las siguientes maneras.

35 El tubo catalizador puede tener básicamente una de las dos configuraciones base. En la primera configuración base, el gas del proceso en el primer canal anular fluye en contracorriente al gas del proceso en el segundo canal anular, y en el mismo sentido con el gas del proceso en el tubo interior. En la segunda configuración base, el gas del proceso en el primer canal anular fluye en contracorriente al gas del proceso en el tubo interior, y en el mismo sentido con el gas del proceso en el segundo canal anular. Se prefiere la primera configuración base, ya que la eficiencia será más alta debido al intercambio de calor efectivo entre el primer y el segundo canal anular. Además, la primera configuración base tiene la ventaja de que el diseño mecánico del tubo catalizador es menos complejo que el de la segunda configuración base.

45 Para establecer la dirección de flujo mencionada anteriormente, el tubo catalizador de acuerdo con la primera configuración base tiene una barrera de salida (6,16) en el extremo de la salida del tubo catalizador para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el primer canal anular y desde el segundo canal anular, mientras permite que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el tubo interior (5,15). En consecuencia, de acuerdo con esta configuración, la abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador; y la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la salida del tubo catalizador.

50 Cada canal tiene dos aberturas, una en el extremo de la entrada y otra en el extremo de la salida del tubo catalizador. De acuerdo con la primera configuración base, la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del primer canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador. En consecuencia, el gas del proceso que ingresa al tubo catalizador fluirá primero a través del primer canal anular. La abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador. En consecuencia, el gas del proceso que sale del primer canal anular entrará subsecuentemente en el segundo canal anular. La abertura del segundo canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador. En consecuencia, el gas del proceso que sale del segundo canal anular entrará subsecuentemente en el tubo interior (5,15). La abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la salida del tubo catalizador. En consecuencia, el gas del proceso que sale del tubo interior (5,15) subsecuentemente podrá salir del tubo catalizador.

65 En consecuencia, cuando se usa el tubo catalizador de acuerdo con la primera configuración base en un proceso de conversión catalítica (por ejemplo, reformado con vapor), el gas del proceso ingresará al tubo catalizador a través de su

entrada, subsecuentemente fluirá a través del primer canal anular hacia el otro (salida) extremo del tubo catalizador (quedando de esta manera sometido al catalizador a alta temperatura), luego fluirá a través del segundo canal anular hacia el extremo de la entrada del tubo catalizador (intercambiando calor con el gas del proceso que fluye a través del primer canal anular) y luego fluirá a través del tubo interior (5,15) a la salida del tubo catalizador. El gas del proceso en el segundo canal anular fluye así en dirección opuesta al primer canal anular y al tubo interior (5,15). En consecuencia, se producirá un intercambio de calor en paralelo entre el gas del proceso que fluye a través del primer canal anular y el gas del proceso que fluye a través del segundo canal anular.

Para establecer la dirección de flujo mencionada anteriormente para la segunda configuración base, el tubo catalizador tiene una barrera de salida (6,16) en el extremo de la salida del tubo catalizador para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el primer canal anular y desde el tubo interior (5,15), mientras que permite que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el segundo canal anular. En consecuencia, de acuerdo con esta configuración, la abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador est  conectada fuidicamente con la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la salida del tubo catalizador; y la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador est  conectada fuidicamente con la salida del tubo catalizador.

De acuerdo con la segunda configuración base, la entrada del tubo catalizador est  conectada fuidicamente con la abertura del primer canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador. En consecuencia, el gas del proceso que ingresa al tubo catalizador fluirá primero a través del primer canal anular. La abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador est  conectada fuidicamente con la abertura del tubo interior en el extremo de la salida del tubo catalizador. En consecuencia, el gas del proceso que sale del primer canal anular entrará subsecuentemente en el tubo interior. La abertura del segundo canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador est  conectada fuidicamente con la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador. En consecuencia, el gas del proceso que sale del tubo interior entrará subsecuentemente en el segundo canal anular del tubo interior. La abertura del segundo canal anular (5,15) en el extremo de la salida del tubo catalizador est  conectada fuidicamente con la salida del tubo catalizador. En consecuencia, el gas del proceso que sale del segundo canal anular (5,15) subsecuentemente podrá salir del tubo catalizador.

En consecuencia, cuando se usa el tubo catalizador de acuerdo con la segunda configuración base en un proceso de conversión catalítica (*por ejemplo*, reformado con vapor), el gas del proceso entrará en el tubo catalizador a través de su entrada, subsecuentemente fluirá a través del primer canal anular hacia el otro extremo (salida) del tubo catalizador (quedando de esta manera sujeto al catalizador a alta temperatura), luego fluirá a través del tubo interior al extremo de la entrada del tubo catalizador y luego fluirá a través del segundo canal anular a la salida del tubo catalizador (intercambiando calor con el gas del proceso que fluye a través del primer canal anular). El gas del proceso en el segundo canal anular fluye así en la misma dirección que el primer canal anular y que el tubo interior (5,15). En consecuencia, se producirá intercambio de calor entre el gas del proceso que fluye a través del primer canal anular y el gas del proceso que fluye a través del segundo canal anular. El diseño adicional del tubo catalizador se discute a continuación.

Un tubo catalizador es un reactor alargado en donde una reacción catalítica (*por ejemplo*, la reacción de reformado) tiene lugar. El tubo catalizador comprende un eje longitudinal, que corresponde a la longitud y la dirección longitudinal del tubo catalizador, y un eje lateral perpendicular al eje longitudinal, que corresponde al ancho del tubo catalizador. Un tubo catalizador tiene dos extremos, uno en ambos extremos del eje longitudinal. El tubo catalizador generalmente tiene un cuerpo tubular alargado, que puede estar constituido esencialmente por el tubo exterior del reactor (1,11). El cuerpo tubular alargado típicamente constituye la mayor parte de la longitud del tubo catalizador.

El tubo catalizador tiene una entrada del tubo catalizador para que el gas del proceso entre en el tubo catalizador. Esta entrada es para proporcionar gas del proceso al primer canal anular. El tubo catalizador tiene además una salida del tubo catalizador para que el gas del proceso salga del tubo catalizador. La entrada y la salida están ubicadas en los extremos opuestos del tubo catalizador. Esto significa que la entrada est  ubicada en un extremo del tubo catalizador (también denominado extremo de la entrada), mientras que la salida est  ubicada en el otro extremo del tubo catalizador (también denominado extremo de la salida). En consecuencia, el término "extremo de la entrada" como se usa en la presente se refiere al extremo del tubo catalizador en el que se encuentra la entrada, mientras que el término "extremo de la salida" como se usa en la presente se refiere al extremo del tubo catalizador en el que se encuentra la salida. En el caso de un reformador de combustión superior, la entrada se ubica típicamente en el extremo superior del tubo catalizador, mientras que la salida se ubica en el extremo inferior. En el caso de un reformador de combustión inferior, la entrada se ubica típicamente en el extremo inferior del tubo catalizador, con la salida ubicada en el extremo superior. El "extremo" o "extremo de un tubo catalizador", como se usa en la presente, se refiere a la porción de un tubo catalizador en o cerca de su extremo. Como tal, también puede denominarse como la "porción final" del tubo catalizador. Por ejemplo, el extremo de un tubo catalizador puede constituir el 20 % o menos, típicamente el 10 % o menos, *por ejemplo* el 5 % o menos, de la longitud total del tubo catalizador. La entrada y/o la salida pueden estar, en consecuencia, ubicadas en una superficie lateral del tubo catalizador (en particular, en una superficie lateral de la porción final del tubo catalizador), o en la superficie superior o inferior del tubo catalizador.

El tubo exterior del reactor (1,11) proporciona el primer canal anular (en donde tiene lugar la reacción catalítica) con su pared exterior. Al mismo tiempo, el tubo exterior del reactor (1,11) también puede ser la pared más externa del tubo del

catalizador. El tubo exterior del reactor (1,11) se hace preferentemente de un material de alta conductividad térmica, tal como un metal o una aleación de metal, *por ejemplo*, acero inoxidable. El tubo exterior del reactor (1,11) puede tener un extremo cónico en el extremo de la salida del tubo catalizador. Tal forma puede proporcionar soporte para elementos presentes en el tubo catalizador, tal como la barrera de salida (6,16) o el tubo interior (5,15). Alternativamente, el grosor de la pared en la parte inferior del tubo puede aumentarse y/o mecanizarse adicionalmente para proporcionar un soporte, mientras se mantiene constante el diámetro exterior en toda la longitud del tubo.

El tubo interior (5,15) se extiende coaxialmente dentro del tubo exterior del reactor (1,11) y forma un pasaje a la salida del tubo catalizador. El tubo interior (5,15) puede extenderse desde la barrera de salida (6,16) (ubicada en el extremo de la salida del tubo catalizador) en dirección longitudinal al extremo de la entrada del tubo catalizador. Dado que el gas del proceso que sale del segundo canal anular debería poder entrar en el tubo interior (5,15), por la misma razón, el tubo interior (5,15) preferentemente no se extiende en dirección longitudinal más allá de la frontera (3,13) en el extremo de la entrada del reformador. Por la misma razón, el tubo interior (5,15) preferentemente no se extiende sobre o a través de la barrera de entrada (4,14). En tal configuración preferida, no se requiere una entrada o salida especial para que el gas del proceso fluya desde el segundo canal anular hacia el tubo interior (5,15). El tubo interior (5,15) puede estar separado de la frontera (3,13) mediante el uso de, *por ejemplo*, elementos de soporte (8,18,9,19) o dispositivos de distribución de flujo o una de sus combinaciones.

El tubo interior (5,15) puede estar hecho de un material cerámico o de metal. El tubo interior (5,15) se hace preferentemente de un material que tiene baja conductividad térmica, tal como un material cerámico, metálico o no metálico. Un material que tiene una baja conductividad térmica se define en la presente descripción como un material que tiene una conductividad térmica por debajo de 10 W/(m.K) a 800 °C y aún con mayor preferencia por debajo de 1 W/(m.K) a 800 °C. Esto puede lograrse fácilmente, *por ejemplo*, mediante el uso de materiales microporosos. El tubo interior (5,15) también puede ser un ensamble, en donde cada parte individualmente puede estar hecha de un material cerámico, metálico o no metálico. Preferentemente, el material también es resistente a la corrosión por carburación y/o polvo de metal. En consecuencia, el intercambio de calor entre el tubo interior (5,15) y el gas del proceso que fluye a través del segundo canal anular puede ser limitado. Tal intercambio de calor es generalmente indeseable, porque reduce la cantidad de calor que puede transferirse desde el gas del proceso en el segundo canal anular al primer canal anular. Por consiguiente, puede ser conveniente seleccionar un material que no sea metal. Sin embargo, el metal puede usarse de manera adecuada, especialmente un metal conductor deficiente que es resistente a la corrosión, *por ejemplo*, proporcionando al metal un recubrimiento protector (*por ejemplo*, un recubrimiento cerámico).

El tubo interior es un cuerpo alargado hueco para mover fluidos. El tubo interior también puede denominarse conducto interior. En una modalidad preferida, el tubo interior es un tubo redondo, que es un tubo que tiene una sección transversal circular. Sin embargo, el tubo también puede ser un tubo de forma diferente, tal como un tubo rectangular. A este respecto, la forma del tubo se refiere a la sección transversal del tubo perpendicular al eje longitudinal del tubo. La sección transversal del tubo interior puede tener varias formas, *por ejemplo*, un cuadrado, un rectángulo, un óvalo, un ovoide o un rombo. La sección transversal de la frontera también puede tener forma de cruz, estrella o circular con un borde en zigzag. Tales formas pueden obtenerse con relativa facilidad formando el tubo interior por extrusión de un material cerámico.

La forma del tubo interior (5,15) no es particularmente crítica. El tubo interior (5,15) puede ser un tubo esencialmente recto. Alternativamente, el tubo interior (5,15) también puede tener una forma helicoidal o una forma en espiral. Un tubo de forma helicoidal se conoce, *por ejemplo*, del documento US 6,620,388 y puede aplicarse adecuadamente en la presente invención. El tubo interior (5,15) puede usarse para soportar la frontera (3,13) y opcionalmente la estructura del catalizador (2,12) unida a la frontera. En consecuencia, el tubo interior (5,15) puede proporcionar una carga fácil del reactor y ayudar a mantener suficiente estabilidad en la operación.

Para ajustar el tubo interior (5,15) en el tubo catalizador, el tubo interior (5,15) puede montarse en la barrera de salida (6,16). Además, o alternativamente, el tubo interior (5,15) puede unirse a la frontera (3,13) mediante el uso de, *por ejemplo*, elementos de soporte (8,18,9,19) y/o dispositivos de distribución de flujo. El tubo interior (5,15) puede estar separado de la frontera (3,13) con elementos de soporte (8,18,9,19) y/o dispositivos de distribución de flujo, preferentemente para garantizar una turbulencia suficiente y, en consecuencia, una velocidad de intercambio de calor mejorada entre el gas que fluye a través del primer canal anular y el gas del proceso que fluye a través del segundo canal anular.

El tubo interior (5,15) puede estar vacío. Generalmente, no es conveniente incluir una empaquetadura en el tubo interior (5,15).

La frontera (3,13) está ubicada entre la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11) y la pared externa del tubo interior (5,15). En consecuencia, la frontera (3,13) se extiende coaxialmente dentro del tubo exterior del reactor (1,11), mientras que el tubo interior (5,15) se extiende coaxialmente dentro de la frontera (3,13). La frontera (3,13) puede extenderse desde la frontera de entrada en la dirección longitudinal hasta el extremo de la salida del tubo catalizador. Dado que el gas del proceso que sale del primer canal anular debería poder entrar en el segundo canal anular, la frontera (3,13) preferentemente no se extiende en la dirección longitudinal más allá del tubo exterior del reactor (1,11) en el extremo de la salida del reformador. Por la misma razón, la frontera (3,13) preferentemente no se extiende sobre o a través de la barrera de salida (6,16). En tal configuración preferida, no se requiere una entrada o salida especial para que el gas del proceso fluya desde el primer canal anular hacia el segundo canal anular.

- La frontera (3,13) forma una frontera entre el primer canal anular y el segundo canal anular. La frontera impide que el gas del proceso pase o penetre en la frontera (3,13). Para ingresar al segundo canal anular, el gas del proceso primero debe pasar a través de la zona catalítica del primer canal anular. Solo entonces el gas del proceso puede ingresar al segundo canal anular. La frontera (3,13) tiene dos extremos (o aberturas); un extremo abierto en el extremo de la salida del tubo catalizador y un extremo cerrado en el extremo de la entrada del tubo catalizador. El extremo cerrado está cerrado por la barrera de entrada (4,14).
- La frontera es, en su diseño más simple, un cuerpo alargado hueco. La frontera tiene una forma tal que proporciona al tubo catalizador un primer y un segundo canal anular. Por ejemplo, la frontera puede ser una frontera tubular. En una modalidad, la frontera tiene la forma de un tubo redondo, que es un tubo que tiene una sección transversal circular. Sin embargo, la sección transversal de la frontera también puede tener una forma diferente, *por ejemplo*, un cuadrado, un rectángulo o un rombo. La sección transversal de la frontera también puede tener forma de cruz, estrella o circular con un borde en zigzag. Por ejemplo, puede usarse adecuadamente una frontera que tenga la forma de un tubo cuadrado. La sección transversal de la frontera tal como se usa en la presente se refiere a la sección transversal de la frontera perpendicular al eje longitudinal de la frontera. El límite puede colocarse como un manguito alrededor del tubo interior.
- Los criterios para seleccionar la forma correcta del tubo interior y la frontera pueden ser la relación entre la superficie del tubo interior y la superficie de la frontera. Cuanto menor es esta relación, mayor proporción de calor se transfiere a la zona catalítica. El intercambiador de calor con el gas que fluye a través del tubo interior debe tenerse en cuenta a este respecto.
- La frontera (3,13) puede estar compuesta de un solo cuerpo hueco alargado, tal como un cilindro hueco o un tubo. Sin embargo, la frontera (3,13) también puede estar compuesta de múltiples cuerpos huecos, *por ejemplo*, múltiples dispositivos tubulares, que pueden apilarse unos sobre otros en la dirección longitudinal del tubo catalizador. Por ejemplo, la frontera (3,13) puede comprender un ensamble continuo de múltiples cuerpos huecos o dispositivos tubulares apilados unos sobre otros, en donde el dispositivo tubular puede *por ejemplo*, tener forma cónica, cilíndrica o tronco cónico.
- La frontera (3,13) se hace preferentemente de un material de alta conductividad térmica. Esto es conveniente, ya que la frontera (3,13) proporciona la superficie sobre la cual se intercambia calor entre el gas del proceso en el primer canal anular y el gas del proceso en el segundo canal anular. El material puede ser de metal o cerámico.
- Si una estructura del catalizador (2,12) está presente en el primer canal anular, el material de la frontera puede ser el mismo material que el usado para la estructura del catalizador (2,12). La frontera (3,13) puede estar separada de la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11), por ejemplo mediante elementos de soporte (8,18,9,19) o, con mayor preferencia, por un catalizador o una estructura del catalizador (2,12) en el primer canal anular.
- El primer canal anular está definido por la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11) y la pared externa de la frontera (3,13). En el primer canal anular, el gas del proceso puede fluir desde el extremo de la entrada del tubo catalizador al extremo de la salida del tubo catalizador. El primer canal anular tiene una abertura a cada lado del canal. La primera abertura es para que el gas del proceso ingrese al primer canal anular y se encuentra en el extremo de la entrada del tubo catalizador. La segunda abertura es para que el gas del proceso salga del primer canal anular y se encuentra en el extremo de la salida del tubo catalizador. El gas del proceso que fluye a través del primer canal anular se somete al catalizador presente en el mismo. En consecuencia, la porción del primer canal anular que se carga con catalizador también puede denominarse en la presente descripción como la zona catalítica.
- El primer canal anular comprende el catalizador para la reacción catalítica. El catalizador puede estar presente en el primer canal anular en cualquier forma adecuada. Por ejemplo, el catalizador puede estar presente en el primer canal anular como gránulos catalíticos o como parte de una estructura catalítica (2,12) (también conocida como catalizador estructurado). El catalizador promueve la reacción catalítica (*por ejemplo*, la reacción de reformado con vapor endotérmica) que actúa como un disipador de calor para eliminar una fracción significativa del calor transferido desde el horno. En caso de que el catalizador sea un catalizador de reformado con vapor, típicamente es un catalizador a base de níquel y puede proporcionarse sobre un soporte cerámico de alta resistencia.
- Preferentemente, el catalizador es un catalizador con alta actividad. Como el volumen del primer canal anular puede ser relativamente pequeño y la velocidad espacial esperada del gas del proceso relativamente alta en comparación con las zonas catalíticas convencionales en los tubos catalizadores, una alta actividad puede compensar un tiempo de residencia relativamente corto del gas del proceso en la zona catalítica. Además, un catalizador adecuado es preferentemente capaz de soportar el procedimiento de carga en el tubo catalizador, así como también las tensiones generadas por las condiciones del proceso y los ciclos térmicos soportados durante las operaciones. Los catalizadores de reformado con vapor y las estructuras de catalizador (2,12) generalmente pueden diseñarse para tener un área superficial geométrica grande y una pequeña caída de presión, ya que el margen de caída de presión a través del reformador con vapor es limitado.
- Ejemplos de catalizadores adecuados son catalizadores recubiertos sobre una estructura o soporte metálico o cerámico. La estructura o soporte no está particularmente restringido a una forma específica, sino que es preferentemente una estructura o soporte que proporciona una mayor turbulencia y mezcla de gases en el canal. Por ejemplo, una estructura

- adecuada puede ser un gránulo. Los gránulos adecuados son conocidos en la técnica y son típicamente de forma cilíndrica. Los gránulos son típicamente porosos. Los gránulos tienen preferentemente una alta porosidad. Las estructuras adecuadas también se conocen en la técnica, por ejemplo, estructuras de flujo cruzado. Por ejemplo, una estructura adecuada puede ser un monolito en forma de panel, alambres tejidos o una espuma. El catalizador puede depositarse sobre la estructura mediante diferentes métodos, que incluyen técnicas de recubrimiento, deposición química de vapor, precipitación directa, etc. Cuanto mayor es la superficie expuesta a la fase gaseosa, mejor para la actividad aparente del catalizador.
- La composición del catalizador se selecciona entre los materiales conocidos activos para la reacción del catalizador, que incluyen pero no se limitan a, catalizadores basados en metales, en donde el metal se selecciona de níquel, rutenio, paladio, iridio, platino, rodio, boro, osmio, oro y sus combinaciones. El experto en la técnica podrá seleccionar la composición elemental específica y la fracción de masa en el catalizador para obtener suficiente actividad para la reacción catalítica.
- En una modalidad preferida, el primer canal anular comprende una estructura del catalizador (2,12), cuya estructura está hecha al menos parcialmente de placas corrugadas, elementos con aletas, una estructura tipo espuma y sus combinaciones. La estructura del catalizador (2,12) puede disponerse en el tubo del reactor de manera que haya suficiente turbulencia en la fase gaseosa para reducir la cantidad de gas del proceso que pasa por el lecho catalítico sin convertir. La estructura puede proporcionar un aumento en la mezcla del gas del proceso en la zona catalítica del primer canal anular. En consecuencia, el gas del proceso puede convertirse lo suficientemente completo a baja caída de presión. El catalizador puede proporcionarse sobre la estructura de cualquier manera adecuada. El catalizador puede proporcionarse, por ejemplo, sobre la estructura fijándolo a la superficie de la estructura (*por ejemplo*, mediante recubrimiento) o mediante la distribución de partículas de catalizador o gránulos en toda la estructura. Esto último puede lograrse, por ejemplo, vertiendo las partículas o gránulos en el primer tubo anular durante el tiempo de inactividad del calentador de combustión.
- Una ventaja de usar la estructura del catalizador descrita anteriormente (2,12) es que la actividad del catalizador se mejora efectivamente por la estructura. Esto es conveniente ya que el gas del proceso generalmente tiene una velocidad relativamente alta a través de la zona catalítica del primer canal anular. Este es especialmente el caso en los tubos catalizadores que se usarán para renovar los reformadores con vapor existentes. Dado que efectivamente están presentes tres canales en el tubo catalizador de la invención, con solo uno de estos tres canales que comprende el catalizador, el volumen de la zona catalítica en el tubo catalizador de la invención es relativamente pequeño. Como resultado, cuando se usa un rendimiento convencional (tasa de flujo), la velocidad del gas del proceso a través del primer canal anular será alta y el catalizador solo tiene un tiempo limitado para convertir el gas del proceso. Sin embargo, si una estructura del catalizador (2,12) está presente en el primer canal anular, esto puede compensar la alta velocidad del gas y el bajo tiempo de contacto. Especialmente, la combinación de un catalizador altamente activo y una estructura del catalizador (2,12) puede compensar la desventaja de la alta velocidad del gas del proceso. Una ventaja de la velocidad relativamente alta del gas del proceso y la buena mezcla en los canales anulares es que puede mejorarse el coeficiente interno de transferencia de calor y la reacción catalítica se mejora de esta manera en comparación con los tubos catalizadores convencionales con lecho de gránulos empaquetados.
- Una ventaja adicional de usar la estructura del catalizador descrita anteriormente (2,12) es que puede simplificar la carga y la sustracción del catalizador durante el tiempo de inactividad. La estructura puede diseñarse y ajustarse de manera que pueda retirarse del tubo catalizador. En este caso, la frontera (3,13) puede fijarse a la estructura del catalizador (2,12), de manera que pueda eliminarse como un todo. Para proporcionar una estructura del catalizador fácilmente extraíble (2,12), el tubo interior (5,15) está provisto preferentemente de elementos de soporte (8,18,9,19) y/o dispositivos de distribución de flujo que soportan la estructura del catalizador (2,12). En tal configuración, la estructura del catalizador (2,12) y la frontera (3,13) pueden, por ejemplo, eliminarse simplemente deslizando la frontera (3,13) de los elementos de soporte (8,18,9,19) del tubo interior (5,15).
- El tubo catalítico puede comprender además un soporte del catalizador para mantener el catalizador en su lugar en el primer canal anular. En particular, el soporte del catalizador está posicionado de manera que evite que el catalizador se mueva hacia el extremo de la salida del tubo catalizador. El soporte del catalizador puede, por ejemplo, estar unido al tubo exterior del reactor. El soporte del catalizador puede colocarse en la abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador. El soporte del catalizador puede colocarse directamente debajo del catalizador o del soporte del catalizador. Un ejemplo de un soporte del catalizador adecuado es una estructura de red. El soporte del catalizador puede estar hecho de cualquier material adecuado, por ejemplo, metal o cerámica. En una modalidad preferida, el soporte del catalizador también puede funcionar como un soporte para el tubo interior, para la frontera o para ambos. En consecuencia, el tubo interior, la frontera o ambos pueden fijarse en el soporte del catalizador. Dado que un soporte del catalizador está típicamente presente en los tubos catalizadores de los reformadores existentes y los reformadores con vapor (y a menudo los calentadores de combustión en general), esto hace que el tubo interior y la frontera sean particularmente fáciles de implementar en los reformadores existentes. El tubo interior o la frontera también pueden estar sujetos por uno o más dispositivos de retención separados, por ejemplo, en caso de ausencia de un soporte del catalizador.

Al final del primer canal anular, puede proporcionarse un pasaje para permitir que el gas del proceso que sale del primer canal anular fluya hacia el segundo canal anular. Tal pasaje puede estar naturalmente presente mediante el uso de la configuración descrita anteriormente.

Una ventaja adicional del tubo catalizador de la presente invención es que proporciona la posibilidad de introducir equipos de medición para medir parámetros (en particular la temperatura y la presión) dentro del reactor sin perturbar la hidrodinámica en el lecho catalítico. Esto permite un control mejorado del rendimiento del reactor en todo momento durante la operación. Por ejemplo, la diferencia de presión entre la entrada del reactor, aguas arriba del catalizador y el segundo canal anular puede medirse y usarse para controlar las condiciones de alimentación del catalizador, incluida, por ejemplo, la relación vapor/carbono, para mantener la productividad más alta mientras minimiza la formación de carbono y el riesgo de fugas. Otra opción es controlar el funcionamiento del horno en función de las lecturas de la temperatura de la fase gaseosa en el segundo canal anular, por ejemplo, directamente debajo del lecho del catalizador y directamente al final de tal segundo canal anular justo en la ubicación donde el gas fluye hacia el tubo interior. De ese modo, el rendimiento del catalizador puede controlarse todo el tiempo y puede conocerse la cantidad de energía transferida desde el gas del proceso a la zona de reacción (desde el segundo espacio anular hacia el lecho catalítico en el primer espacio anular). Como resultado, al conocer también la temperatura de cruce o la temperatura de la pared del puente del horno (temperatura en la ubicación de extracción de gases de combustión), es posible controlar la velocidad de cocción en todo momento para maximizar el rendimiento energético del proceso en todo momento en la operación. Al combinar estos métodos de medición y control, puede adoptarse una optimización en línea del rendimiento del horno.

El segundo canal anular está definido por la pared interna de la frontera (3,13) y la pared externa del tubo interior (5,15). El segundo canal anular proporciona el intercambio de calor entre el gas que fluye a través de él y el gas del proceso que fluye a través del primer canal anular. En el segundo canal anular, el gas del proceso fluye en el mismo sentido o en contracorriente al gas del proceso en el primer canal anular, es decir, desde el extremo de la salida del tubo catalizador al extremo de la entrada del tubo catalizador o en la dirección opuesta. El segundo canal anular tiene una abertura en ambos lados del canal. La primera abertura es para que el gas del proceso ingrese al segundo canal anular y, en el caso de que la primera configuración base esté ubicada en el extremo de la salida del tubo catalizador. La segunda abertura es para que el gas del proceso salga del segundo canal anular y, en el caso de la primera configuración base, se encuentra en el extremo de la entrada del tubo catalizador.

Como también se describió anteriormente, el segundo canal anular puede comprender elementos de soporte (8,18,9,19) o dispositivos de distribución de flujo o ambos. Los elementos de soporte (8,18,9,19) pueden separar la frontera (3,13) del tubo interior (5,15), mientras que los dispositivos de distribución de flujo pueden proporcionar una turbulencia o un flujo conveniente en el canal.

La barrera de entrada (4,14) se encuentra en el extremo de la entrada del tubo catalizador. La barrera de entrada (4,14) es para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el segundo canal anular y desde el tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador. En consecuencia, la barrera de entrada (4,14) impedirá al mismo tiempo que el gas del proceso entre en el segundo canal anular y en el tubo interior (5,15) sin haber pasado primero por el primer canal anular. En particular, la barrera de entrada (4,14) evita que el gas del proceso salga o entre en la parte interna de la frontera (3,13) en el extremo de la entrada del tubo catalizador. Esto puede lograrse cerrando con una barrera la abertura de la frontera (3,13) que está más cerca del extremo de la entrada del tubo catalizador. En consecuencia, la barrera de entrada (4,14) puede proporcionarse por la frontera (3,13) que tiene un extremo cerrado en el extremo de la entrada del tubo catalizador. El extremo cerrado se proporciona preferentemente fijando la barrera de entrada (4,14) a la frontera (3,13), por ejemplo a las paredes internas o a la pared superior de la frontera (3,13). La fijación puede hacerse por cualquier medio, *por ejemplo*, por soldadura. La barrera de entrada puede ser una placa hecha de *por ejemplo*, metal o cerámica. La barrera de entrada (4,14) puede tener cualquier forma adecuada, tal como un disco circular. La barrera de entrada (4,14) evita además que el gas del proceso escape del segundo canal anular hacia la entrada del tubo catalizador. La barrera de entrada (4,14) puede estar hecha de metal o cerámica. La barrera de entrada puede formar un cuerpo continuo con el catalizador estructurado. La barrera de entrada (4,14) puede estar hecha del mismo material o diferente que el tubo interior del reactor, por ejemplo cerámica o metal recubierto con cerámica o una aleación resistente a la corrosión por carburación.

La barrera de entrada (4,14) generalmente se soporta en el tubo catalizador uniéndose a la frontera (3,13). Si hay un cabezal presente (ver más abajo), la barrera de entrada (4,14) también puede estar unida al encabezado.

La barrera de salida (6,16) se encuentra en el extremo de la salida del tubo catalizador. En el caso de la primera configuración base, la barrera de salida (6,16) es para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor desde el primer y el segundo canal anular, mientras permite que el gas del proceso sale del tubo exterior del reactor (1,11) desde el tubo interior (5,15). Sin tal barrera de salida (6,16), el gas del proceso que sale del primer canal anular saldría del tubo exterior del reactor (1,11). La barrera de salida (6,16) asegura que el gas del proceso se alimente al segundo canal anular, de manera que el primer proceso tenga que fluir a través del segundo canal anular y el tubo interior (5,15) antes de salir del tubo exterior del reactor (1,11). La barrera de salida (6,16) típicamente comprende un espacio para permitir que el gas del proceso salga del tubo interior (5,15). En el caso de la segunda configuración base, la barrera de salida es para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor desde el primer canal anular y desde el

tubo interior, mientras permite que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el segundo canal anular.

La barrera de salida (6,16) puede conectarse o fijarse al tubo exterior del reactor (1,11) o al tubo interior (5,15) o a ambos. Por ejemplo, la barrera de salida (6,16) puede fijarse por cualquier medio a la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11) o a la pared externa del tubo interior (5,15), *por ejemplo*, por soldadura. En caso de que el tubo exterior tenga un extremo cónico (7,17), la barrera de salida (6,16) también puede mantenerse en la transición cónica del tubo exterior del reactor (1,11).

La barrera de salida (6,16) también puede proporcionar soporte al tubo interior (5,15). Por ejemplo, el tubo interior (5,15) puede montarse en la superficie de la barrera de salida (6,16) (*es decir*, en la superficie frente al extremo de la entrada del tubo catalizador). El tubo interior (5,15) también puede extenderse o incluso extenderse a través de la barrera. El tubo interior (5,15) también puede extenderse dentro de un tubo de salida (17) del tubo catalizador o dentro de un ensamble de salida, o cable flexible de salida que puede estar presente debajo del tubo catalizador.

En el caso de la primera configuración base, la barrera de salida (6,16) puede comprender una superficie circular que comprende un espacio en su centro. El espacio proporciona una abertura para que el gas del proceso salga del tubo interior (5,15). La forma circular es adecuada para cerrar el primer y segundo canal anular. La superficie circular puede estar conectada a sus lados a la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11). La superficie circular puede ser parte de la superficie de un cuerpo en forma de cono, un cuerpo en forma de cilindro o un cuerpo en forma de tronco cónico. Tales formas de los cuerpos pueden proporcionar formas adecuadas para la barrera de salida (6,16). Por ejemplo, la barrera de salida (6,16) puede ser un disco circular con un orificio en el medio.

El tubo catalizador puede comprender además un cabezal, en donde el gas del proceso puede transportarse desde la entrada al primer canal anular. El cabezal también puede actuar como un recubrimiento o tapa para el tubo exterior del reactor (1,11) en el extremo de la entrada del tubo catalizador. El cabezal puede unirse al extremo de la entrada del tubo exterior del reactor (1,11), *por ejemplo*, por medios mecánicos tal como tornillos o pernos. El cabezal también puede proporcionar soporte adicional a los diferentes elementos en el tubo catalizador, tal como la frontera (3,13) y la barrera de entrada (4,14).

El tubo catalizador puede montarse en la sección radiante de un horno industrial o un calentador de combustión, *por ejemplo*, de un reformador con vapor. El tubo catalizador de acuerdo con la invención es preferentemente adecuado para su inserción en la cámara del horno de un horno industrial o un calentador de combustión (*por ejemplo*, un reformador con vapor). El tubo catalizador puede entonces insertarse en la cámara del horno y fijarse con uno de sus extremos a una pared de la cámara del horno y con su otro extremo a la pared opuesta de la cámara del horno. Preferentemente, el tubo catalizador está unido de forma desmontable en el horno industrial o en el calentador de combustión. De este modo, el tubo catalizador puede retirarse fácilmente de la cámara del horno durante el tiempo de inactividad. Esto hace que sea más fácil proporcionar material catalizador nuevo en los tubos catalizadores si es necesario.

Las dimensiones adecuadas para el tubo interior (5,15), la frontera (3,13) y el tubo exterior del reactor (1,11) pueden seleccionarse de la siguiente manera.

A menos que de cualquier otra manera se indique lo contrario, el término "diámetro" como se usa en la presente se refiere al diámetro interno del tubo, tubería o frontera. Esto significa que el grosor de la pared del tubo, tubería o frontera está excluido del diámetro.

El diámetro del tubo exterior del reactor (1,11) no es particularmente crítico. Sin embargo, en caso de que el tubo catalizador se use en un reformador con vapor existente (*es decir*, renovado), el diámetro del tubo exterior del reactor (1,11) puede ser predeterminado y, a menudo, relativamente pequeño. Generalmente, el diámetro del tubo exterior del reactor se encuentra en el intervalo de 5 a 25 cm. Cuando se hace referencia al diámetro del tubo exterior del reactor en la presente descripción, el grosor de la pared del tubo exterior del reactor se excluye del diámetro.

El tamaño del diámetro de la frontera (3,13) está determinado en gran parte por el volumen mínimo requerido para el primer canal anular, por la velocidad espacial requerida y por la caída de presión implicada por el catalizador.

Con respecto al volumen del primer canal anular, la zona catalítica necesita tener un volumen suficientemente grande para poder convertir el gas del proceso lo suficientemente completo. En consecuencia, a menos que se use un catalizador con una actividad excepcionalmente alta, el diámetro de la frontera (3,13) no debe ser demasiado grande con relación al diámetro del tubo exterior del reactor. El valor máximo de la frontera depende en gran medida de parámetros tal como el diámetro del tubo exterior del reactor y la velocidad de flujo que se usará. El diámetro de la frontera (3,13) a menudo puede ser inferior al 90 % del diámetro del tubo exterior del reactor, por ejemplo, en el caso de un tubo exterior convencional con un diámetro de 10 cm operado a una velocidad de flujo moderada. Sin embargo, para tubos de reactor externo de alto rendimiento y/o de gran diámetro, este porcentaje puede ser mayor.

El volumen de la zona catalítica en el primer canal anular no debe ser demasiado grande, ya que daría como resultado una reducción significativa en el área disponible para la transferencia de calor y un aumento excesivo en la caída de

presión en el segundo espacio anular y el tubo interior. En consecuencia, el diámetro de la frontera (3,13) generalmente puede ser al menos el 50 % del tamaño del diámetro del tubo exterior del reactor (excluyendo el grosor de la pared del tubo exterior del reactor).

- 5 El diámetro de la frontera (3,13) generalmente puede ser del 50-95 %, por ejemplo del 58-90 % del tamaño del diámetro del tubo exterior del reactor (excluyendo el grosor de la pared del tubo exterior del reactor).

10 El tamaño del diámetro del tubo interior puede ajustarse de manera que se obtenga una alta velocidad del gas del proceso en el segundo espacio anular. Tal alta velocidad puede promover la transferencia de calor del gas del proceso caliente en el segundo canal anular al gas del proceso en la zona catalítica del primer canal anular. En consecuencia, el diámetro del tubo interior se selecciona de manera que la diferencia entre el diámetro de la frontera y el diámetro del tubo interior esté en el intervalo del 10 al 50 %, preferentemente del 15 al 40 % del tamaño del diámetro del tubo exterior del reactor (excluyendo el grosor de la pared del tubo exterior del reactor).

- 15 El diámetro del tubo interior (5,15) puede estar en el intervalo de 1,0 a 4,0 cm, preferentemente de 2,0 a 3,0 cm. El diámetro se establece preferentemente en un tamaño igual o menor que el diámetro del tubo de salida del tubo catalizador (17), que es típicamente de aproximadamente 2,5 cm. Tales diámetros son suficientemente grandes para limitar la caída de presión dentro del tubo interior.

20 En un segundo aspecto, la invención se dirige a un reactor multitubular que comprende una cámara de horno y al menos un tubo catalizador de acuerdo con la invención. El reactor multitubular puede comprender múltiples tubos catalizadores que son paralelos entre sí. La cámara del horno puede comprender, por ejemplo, una o más hileras de tubos catalizadores. Por ejemplo, un reactor multitubular de combustión superior típico tiene gas del proceso que fluye aguas abajo a través de múltiples hileras de tubos, todos los cuales están contenidos dentro de la cámara del horno. Los quemadores se encuentran en la parte superior del horno en hileras entre cada hilera de tubos y el gas de combustión se extrae en la parte inferior del horno. Para un reactor multitubular de vapor de combustión inferior, puede usarse una configuración similar con los quemadores en la parte inferior y el proceso fluyendo aguas arriba.

30 El reactor multitubular puede comprender una cámara de horno en donde los quemadores calientan directamente los tubos catalizadores. Por ejemplo, el reactor multitubular puede ser un reactor de combustión superior, inferior o lateral. Las entradas del tubo catalizador y las salidas del tubo catalizador de al menos un tubo catalizador están ubicadas en lados opuestos de la cámara del horno.

35 Alternativamente, los tubos catalizadores también pueden ser calentados indirectamente por los quemadores, *por ejemplo*, a través de un medio de calor como el vapor calentado. Un reactor multitubular indirecto comprende una cámara de combustión externa. En este caso, la cámara del horno puede tener un compartimento que comprende los quemadores (que se denomina cámara de combustión externa) y un compartimento separado que comprende los tubos catalizadores.

40 En una modalidad preferida, el reactor multitubular es un reformador con vapor. Sin embargo, en principio, el reactor de la invención es adecuado para acomodar cualquier conversión catalítica en la que la transferencia de calor desempeñe un papel importante en la producción del producto convertido. *por ejemplo*, reactores para la conversión catalítica a amoníaco, conversión catalítica a metanol, convertidores de cambio de agua y gas, convertidores catalíticos Fischer Tropsch, etc.

45 En un tercer aspecto, la invención se dirige a un método para llevar a cabo una reacción catalítica en un tubo catalizador de acuerdo con la invención. El flujo del gas del proceso en tal método ya se ha descrito anteriormente. El método comprende en consecuencia el intercambio de calor entre el gas que fluye a través del primer canal anular y el gas que fluye a través del segundo canal anular.

50 La reacción catalítica es en particular una reacción de conversión catalítica. En principio, cualquier conversión catalítica en la que la transferencia de calor juega un papel importante en la producción del producto convertido puede realizarse adecuadamente en el tubo catalizador de la invención. Un ejemplo de tales reacciones son el reformado con vapor, la conversión catalítica en amoníaco. En una modalidad preferida, el método es para realizar un reformado regenerativo con vapor.

55 En un cuarto aspecto, la invención se dirige al uso de un tubo catalizador de acuerdo con la invención para renovar un reformador con vapor del tipo 2 existente *es decir*, un reformador con vapor en donde las entradas y salidas del tubo catalizador están ubicadas en lados opuestos de la cámara del horno. En tal reformador con vapor, el tubo catalizador de acuerdo con la invención puede reemplazar los tubos catalizadores existentes, lo que hace posible realizar un reformado regenerativo en el reformador con vapor.

60 En una modalidad preferida, la renovación de un reformador con vapor se realiza mediante el uso del soporte del catalizador existente en los tubos reformadores del reformador con vapor existente. Esto tiene la ventaja de que no es necesario desplazar el soporte del catalizador existente, lo que implicaría un extenso trabajo de soldadura en el sitio. El papel del soporte del catalizador en los tubos reformadores convencionales en los reformadores existentes es mantener

el catalizador en su lugar. En consecuencia, el tubo interior y/o la frontera se colocan en los tubos reformadores existentes mediante el uso del soporte del catalizador existente como soporte.

- 5 De acuerdo con este aspecto de la invención, el tubo catalizador de acuerdo con la invención también puede usarse para renovar un horno industrial existente o un calentador de combustión en general, *por ejemplo*, reemplazando un tubo catalizador existente con un tubo catalizador de acuerdo con la invención y/o mediante el uso del soporte del catalizador existente si es posible.

REIVINDICACIONES

1. Un tubo catalizador para la conversión catalítica regenerativa de gas del proceso en un horno industrial que comprende
 - una entrada del tubo catalizador para que el gas del proceso entre en el tubo catalizador y una salida del tubo catalizador para que el gas del proceso salga del tubo catalizador, cuya entrada y salida se encuentran en los extremos opuestos del tubo catalizador;
 - un tubo exterior del reactor (1,11);
 - un tubo interior (5,15) que se extiende coaxialmente dentro del tubo exterior del reactor (1,11);
 - una frontera (3,13) ubicada entre la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11) y la pared externa del tubo interior (5,15);
 - un primer canal anular para convertir catalíticamente el gas del proceso, cuyo canal está definido por la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11) y la pared externa de la frontera (3,13), cuyo canal está cargado con material catalizador;
 - un segundo canal anular para que el gas del proceso fluya en contracorriente o en el mismo sentido al gas del proceso que fluye a través del primer canal anular, cuyo segundo canal anular está definido por la pared interna de la frontera (3,13) y la pared externa del tubo interior (5,15);
 - una barrera de entrada (4,14) en el extremo de la entrada del tubo catalizador para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el segundo canal anular y desde el tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador;
 - una barrera de salida (6,16) en el extremo de la salida del tubo catalizador para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el primer canal anular y desde uno del segundo canal anular y el tubo interior (5,15), mientras se permite que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el otro del segundo canal anular y el tubo interior (5,15);
 en donde el tubo interior, el primer canal anular y el segundo canal anular tienen cada uno una abertura en el lado de la entrada del tubo catalizador y una abertura en el lado de la salida del tubo catalizador, en donde la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del primer canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador; la abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador o con la abertura del tubo interior en el extremo de la salida del tubo catalizador; la abertura del segundo canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador; y o bien la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la salida del tubo catalizador o la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la salida del tubo catalizador.
2. Un tubo catalizador de acuerdo con la reivindicación 1, en donde
 - la barrera de salida (6,16) es una barrera de salida (6,16) en el extremo de la salida del tubo catalizador para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el primer canal anular y desde el segundo canal anular, mientras permite que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el tubo interior (5,15); y
 en donde la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del primer canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador; la abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador; la abertura del segundo canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador; y la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la salida del tubo catalizador.
3. Un tubo catalizador de acuerdo con la reivindicación 1, en donde
 - la barrera de salida (6,16) es una barrera de salida (6,16) en el extremo de la salida del tubo catalizador para evitar que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el primer canal anular y desde el tubo interior (5,15), mientras permite que el gas del proceso salga del tubo exterior del reactor (1,11) desde el segundo canal anular; y
 en donde la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del primer canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador; la abertura del primer canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del tubo interior en el extremo de la salida del tubo catalizador; la abertura del segundo canal anular en el extremo de la entrada del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la abertura del tubo interior (5,15) en el extremo de la entrada del tubo catalizador; y la abertura del segundo canal anular en el extremo de la salida del tubo catalizador está conectada fluidicamente con la salida del tubo catalizador.
4. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde la barrera de salida (6,16) comprende una superficie circular conectada por sus lados a la pared interna del tubo exterior del reactor (1,11), en donde la superficie circular comprende un espacio en su centro para permitir que el gas del proceso salga del tubo interior (5,15).

5. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4, en donde la barrera de salida (6,16) comprende un cuerpo en forma de cono, un cuerpo en forma de cilindro o un cuerpo en forma de tronco cónico.
- 5 6. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-5, en donde el tubo interior (5,15) está montado en la superficie de la barrera de salida (6,16) o en donde el tubo interior (5,15) se extiende a través de la barrera de salida (6,16).
7. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el tubo exterior del reactor (1,11) tiene un extremo cónico (7,17) en el extremo de la salida del reactor.
- 10 8. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la frontera (3,13) tiene un extremo abierto en el extremo de la salida del tubo catalizador y un extremo cerrado en el extremo de la entrada del tubo catalizador, en donde el extremo cerrado está cerrado fuera por la barrera de entrada (4,14), en donde la barrera de entrada (4,14) está preferentemente fijada o soldada a la frontera (3,13) en el extremo de la entrada del reactor.
- 15 9. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el primer canal anular comprende una estructura que comprende una o más de placas onduladas, elementos con aletas y espuma, sobre la cual se proporciona la estructura del catalizador.
- 20 10. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la frontera (3,13) se hace de un material de alta conductividad térmica.
- 25 11. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la frontera (3,13) comprende un ensamble continuo de múltiples dispositivos tubulares apilados uno sobre otro, en donde el dispositivo tubular puede tener una forma cónica, cilíndrica o de tronco cónico.
- 30 12. Un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el tubo del reactor interno se hace de un material de baja conductividad térmica que tiene una conductividad térmica por debajo de 10 W/(m.K) a 800 °C.
- 35 13. Un reactor multitubular que comprende una cámara de horno y al menos un tubo catalizador de acuerdo con la reivindicación 1, en donde las entradas del tubo catalizador y las salidas de tubo catalizador del al menos un tubo catalizador están ubicadas en lados opuestos de la cámara del horno, la cámara del horno opcionalmente comprende múltiples hileras de tubos catalizadores contenidos dentro de la cámara del horno y en donde los quemadores están ubicados en hileras entre cada hilera de tubos.
- 40 14. Un reactor multitubular de acuerdo con la reivindicación 13, en donde el reactor es un reformador con vapor.
15. Un método para llevar a cabo una reacción de conversión catalítica en un tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-12 o en un reactor de acuerdo con la reivindicación 13 o 14.
- 45 16. Uso del tubo catalizador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-12 para renovar un reformador, en donde el reformador comprende una cámara de horno y al menos un tubo catalizador, en donde las entradas del tubo catalizador y las salidas del tubo catalizador del al menos un tubo catalizador están situadas en lados opuestos de la cámara del horno, cuya renovación se realiza opcionalmente uniendo el tubo interior, la frontera o ambos al soporte del catalizador existente en los tubos reformadores del reformador existente.

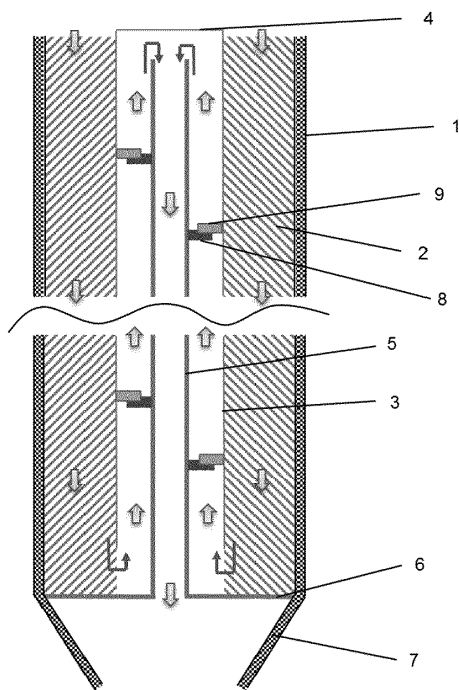


Fig 1

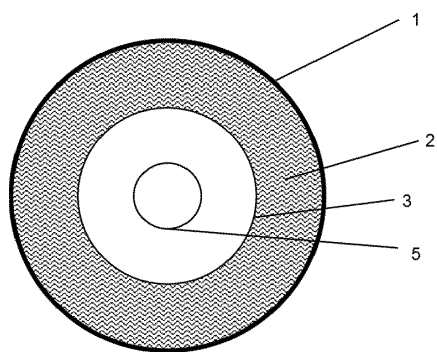


Fig 2

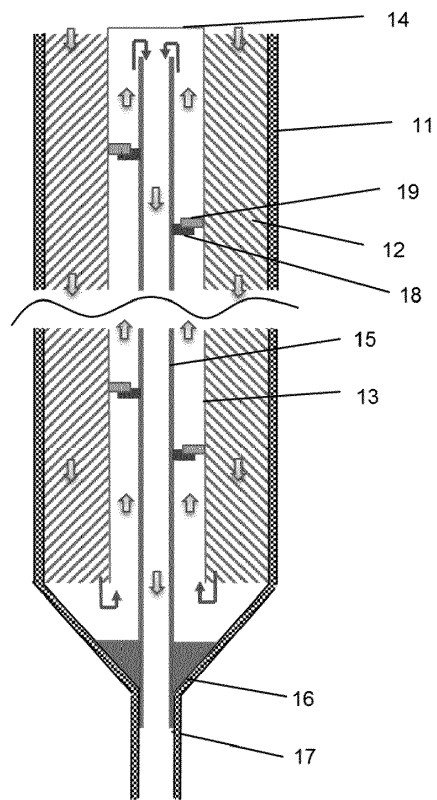


Fig 3

Transferencia de calor interno en el sentido del flujo

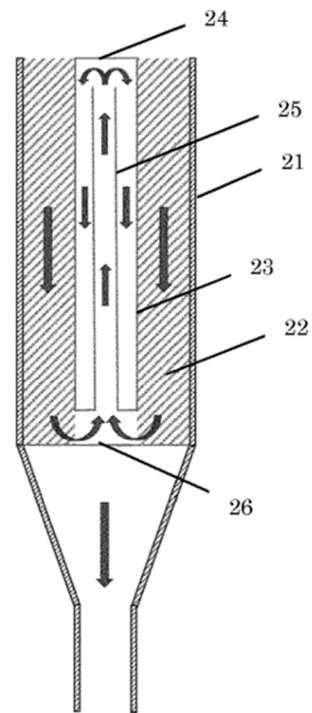
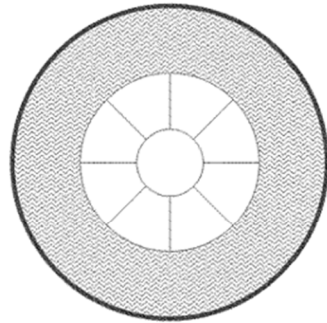


Fig 4

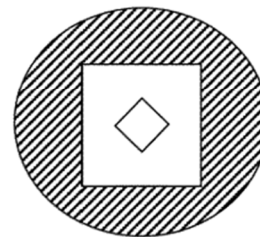
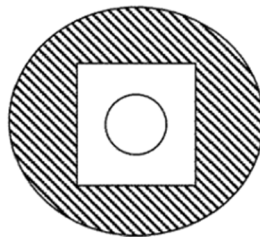
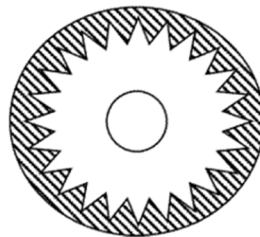
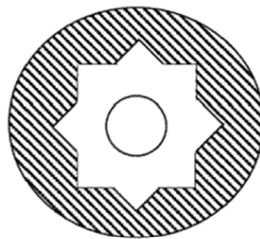
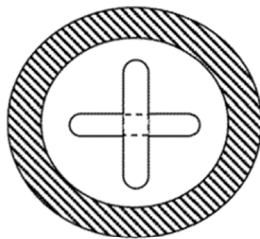


Fig 5