

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 975 159**

51 Int. Cl.:

B01J 8/06 (2006.01)

B01J 19/24 (2006.01)

C10G 9/36 (2006.01)

F28D 7/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.04.2017** **E 17000601 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.03.2024** **EP 3384981**

54 Título: **Tubo y dispositivo para el craqueo térmico de hidrocarburos**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
03.07.2024

73 Titular/es:
SCHMIDT + CLEMENS GMBH + CO. KG (100.0%)
Kaiserau 2
51789 Lindlar, DE

72 Inventor/es:
HEYLAND, STEFFEN ALEXANDER;
JAKOBI, DIETLINDE y
WEIGANDT, JÖRG DIETMAR

74 Agente/Representante:
SÁEZ MAESO, Ana

Observaciones:

Véase nota informativa (Remarks, Remarques o Bemerkungen) en el folleto original publicado por la Oficina Europea de Patentes

ES 2 975 159 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 y dispositivo para el craqueo térmico de hidrocarburos

La invención se refiere a un tubo para el craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en el que la mezcla de alimentación se hace pasar a través de tubos calentados externamente. La invención también se refiere a un dispositivo para el craqueo térmico de hidrocarburos.

Para la pirólisis a alta temperatura de hidrocarburos (derivados del petróleo) han demostrado su eficacia hornos tubulares en los que una mezcla de hidrocarburos y vapor de agua se hace pasar a temperaturas superiores a 750 °C a través de hileras de tubos individuales o serpenteantes (serpentes tubulares de craqueo) fabricados con una aleación de níquel-cromo-hierro resistente al calor, con una elevada resistencia a la oxidación o a las incrustaciones y una elevada resistencia a la carburación. Los serpentines constan de tramos de tubo rectos que discurren vertical u horizontalmente y que están conectados entre sí mediante codos de tubo en forma de U o dispuestos en paralelo entre sí. Por lo general, se calientan con la ayuda de quemadores de pared lateral y/o inferior y, por lo tanto, tienen un llamado lado soleado orientado hacia los quemadores y un llamado lado sombreado desplazado 90°, es decir, que discurre en la dirección de las hileras de tubos. Las temperaturas medias de la pared del tubo (TMT) superan a veces los 1000 °C.

La vida útil de los tubos de craqueo depende en gran medida de la resistencia a la fluencia y a la carburación, así como de la velocidad de coquización del material del tubo. Para la velocidad de coquización, es decir, para el crecimiento de una capa de depósitos de carbono (coque de pirólisis) en la pared interior de la tubería, son determinantes, además del tipo de hidrocarburos utilizados, la temperatura del gas de craqueo en la zona de la pared interior y la denominada severidad de craqueo, detrás de la cual se oculta la influencia de la presión del sistema y del tiempo de permanencia en el sistema de tuberías sobre el rendimiento de etileno. La severidad del craqueo se establece en función de la temperatura media de salida de los gases de craqueo (por ejemplo, 850 °C). Cuanto mayor sea la temperatura del gas cerca de la pared interior del tubo por encima de esta temperatura, más fuerte crecerá la capa de coque de pirólisis, cuyo efecto aislante hace que la temperatura de la pared del tubo aumente aún más. Aunque la aleación de níquel, cromo y hierro con un 0,4% de carbono, más de un 25% de cromo y más de un 20% de níquel, por ejemplo un 35% de cromo, un 45% de níquel y posiblemente un 1% de niobio, utilizada como material del tubo tiene una gran resistencia a la carburación, el carbono se difunde en la pared del tubo en los defectos de la capa de óxido y provoca allí una carburación considerable, que puede alcanzar contenidos de carbono del 1% al 3% en profundidades de pared de 0,5 mm a 3 mm. Esto se asocia a una fragilización considerable del material del tubo con el riesgo de agrietamiento bajo cargas térmicas alternas, especialmente al arrancar y apagar el horno.

Para desintegrar los depósitos de carbono (coquización) en la pared interior del tubo, es necesario interrumpir la operación de craqueo de vez en cuando y quemar el coque de pirólisis con la ayuda de una mezcla de vapor/aire. Esto requiere una interrupción de la operación de hasta 36 horas y, por lo tanto, perjudica considerablemente la eficiencia económica del procedimiento.

El uso de tubos de craqueo con aletas interiores también es conocido por la especificación de patente británica 969 796 y la especificación de divulgación europea 1 136 541 A1. Aunque estas aletas interiores dan como resultado una superficie interior mucho mayor, por ejemplo en un 10%, y en consecuencia una mejor transferencia de calor, también tienen la desventaja de una pérdida de presión considerablemente mayor debido a la fricción en la superficie interior ampliada del tubo en comparación con un tubo liso. La mayor pérdida de presión requiere una mayor presión del sistema, lo que inevitablemente modifica el tiempo de residencia y reduce el rendimiento. Además, los materiales conocidos para tubos con alto contenido en carbono y cromo ya no pueden perfilarse mediante conformación en frío, como el estirado en frío, por ejemplo. Tienen la desventaja de que su conformabilidad se reduce considerablemente al aumentar la resistencia al calor. En consecuencia, las elevadas temperaturas de pared de los tubos de hasta 1050 °C, por ejemplo, que son deseables en relación con el rendimiento de etileno, requieren el uso de tubos de fundición centrífuga. Sin embargo, dado que los tubos de fundición centrífuga sólo pueden fabricarse con paredes cilíndricas, se requieren procedimientos de conformación especiales, por ejemplo, mecanizado electrolítico o un procedimiento de soldadura de conformación, para fabricar tubos interiores.

Por último, también se conoce todo un espectro de ángulos de inclinación y también de distancias entre las aletas interiores por la especificación de patente estadounidense 5 950 718, sin que, no obstante, se tenga en cuenta la naturaleza de las aletas.

En el documento EP 1 525 289 B9 se conoce un tubo con aletas para el craqueo térmico de hidrocarburos, que tiene aletas interiores helicoidales inclinadas en relación con el eje del tubo.

El documento WO 2010/043375 A1 divulga una aleación de níquel-cromo-hierro con alta resistencia a la oxidación y a la carburación, resistencia al deslizamiento y resistencia a la fluencia que comprende de 0,4% a 0,6% de carbono, de 28% a 33% de cromo, de 15% a 25% de hierro, de 2% a 6% de aluminio, hasta el 2% de silicio, hasta el 2% de manganeso, hasta el 1,5% de niobio, hasta el 1,5% de tántalo, hasta el 1,0% de wolframio, hasta el 1,0% de titanio, hasta el 1,0% de circonio, hasta el 0,5% de itrio, hasta el 0,5% de cerio, hasta el 0,5% de molibdeno, hasta el 0,1% de nitrógeno, y el resto de níquel, incluidas las impurezas causadas por la fusión.

En este contexto, la invención se basa en el objetivo de mejorar la productividad del craqueo térmico de hidrocarburos en hornos tubulares con tubos calentados externamente.

Este objetivo se logra mediante los objetos de las reivindicaciones 1, 2, 9 y 10. Las formas de realización ventajosas se describen en las reivindicaciones dependientes y en la descripción que sigue.

5 Se ha reconocido que en un tubo con las características del preámbulo de la reivindicación 1, existe una relación entre las características que caracterizan al tubo, a saber

- el número N_T de ranuras introducidas en la superficie interior del tubo y que se extienden helicoidalmente alrededor del eje longitudinal a lo largo de la superficie interior,
- 10 • el diámetro de la superficie interior en la que se han introducido las ranuras, en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal,
- el radio r_2 de la base de ranura de las ranuras que tienen cada una la forma de un arco de círculo en su base de ranura en la sección transversal perpendicular al eje longitudinal, y
- 15 • la profundidad de ranura TT de las ranuras, que en la sección transversal perpendicular al eje longitudinal corresponde en cada caso a la distancia más pequeña entre el círculo con el diámetro D_i , en el que se encuentra la superficie interior y cuyo centro se encuentra en el eje longitudinal, y el punto más alejado de la base de ranura de la ranura desde el eje longitudinal,

que, si se tiene en cuenta, puede mejorar la productividad del craqueo térmico de hidrocarburos en hornos tubulares con tubos calentados externamente.

20 De hecho, se reconoció que puede desarrollarse un valor característico basado en consideraciones de transferencia de calor que puede calcularse de dos maneras diferentes, pero cada una de ellas dependiendo únicamente de los rasgos que caracterizan al tubo descrito anteriormente.

Según una primera consideración de transferencia de calor, este valor característico puede expresarse como

$$P1 * |D_{\bar{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\bar{A}qv}| + P3$$

25 con las constantes $P1$, $P2$ y $P3$, así como el valor numérico $|D_{\bar{A}qv}|$ del diámetro equivalente $D_{\bar{A}qv}$, que depende del diámetro interior D_i medido en mm.

Se obtienen buenos resultados si se selecciona un número del intervalo reivindicado de -0,2 a -0,3 como la constante $P1$. En una forma de realización preferida, la constante $P1$ se selecciona de un intervalo de -0,25 a -0,295, en particular preferiblemente de un intervalo de -0,287 a -0,2655. En particular, la constante $P1$ es preferentemente igual a -0,287 o -0,2655.

30 Se obtienen buenos resultados si se selecciona un número del intervalo reivindicado de 310 a 315 como la constante $P2$. En una forma de realización preferida, la constante $P2$ se selecciona de un intervalo de 310 a 312, en particular preferiblemente de un intervalo de 310,42 a 311,31. De manera particularmente preferida, la constante $P2$ es igual a 310,42 o 311,31.

35 Se obtienen buenos resultados si se selecciona un número del intervalo reivindicado de 200 a 1500 como la constante $P3$. En una forma de realización preferida, la constante $P3$ se selecciona de un intervalo de 230 a 1400, en particular preferiblemente de un intervalo de 261,21 a 1076. En particular, la constante $P3$ es preferiblemente igual a 261,21 o 1076.

40 El valor característico utilizado para el diseño del tubo según la invención se expresa en la relación antes mencionada en función del valor numérico $|D_{\bar{A}qv}|$ del diámetro equivalente $D_{\bar{A}qv}$, que depende del diámetro interior D_i medido en mm. En este contexto y en los demás documentos, se entiende por "valor numérico" el número adimensional de un valor de una magnitud física compuesto por el valor numérico y la unidad de medida. Una magnitud física es una propiedad cuantitativamente determinable de un objeto, procedimiento o estado físico. Su valor (valor de la magnitud) se especifica como el producto de un valor numérico (valor de medición) y una unidad de medida. Dado que las relaciones utilizadas para el diseño del tubo según la invención son adimensionales, se utiliza el valor numérico de las magnitudes físicas. Para que esto quede claro, el valor numérico de una magnitud se representa en la descripción y en las reivindicaciones con la nomenclatura utilizada frecuentemente para la representación de una cantidad tal como, por ejemplo, $|D_{\bar{A}qv}|$. La representación de una variable entre dos líneas horizontales, como $|D_{\bar{A}qv}|$, se entiende en el contexto de la presente descripción y de las reivindicaciones como una representación del valor numérico del valor (valor de magnitud), expresado por la variable, de una magnitud física. Por ejemplo, el valor numérico $|D_i|$ de un diámetro D_i , medido en mm, de 70 mm es el número 70.

50 El valor característico utilizado para el diseño del tubo según la invención se expresa en la relación antes mencionada en función del valor numérico $|D_{\bar{A}qv}|$ del diámetro equivalente $D_{\bar{A}qv}$, que depende del diámetro interior D_i medido en mm. El diámetro equivalente es el diámetro de la superficie interior que tendría un tubo liso no provisto de ranuras, cuya área de

paso corresponde al área de paso del tubo según la invención. En una sección transversal perpendicular al eje longitudinal, se entiende por área de paso al área libre en el interior del tubo. Se ha demostrado que las consideraciones relacionadas con la transferencia de calor a menudo pueden llevarse a cabo más fácilmente en un tubo liso. También se ha demostrado que los usuarios del tubo según la invención han trabajado a menudo con tubos lisos en el pasado en sus dispositivos para el craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en los que la mezcla de alimentación se introduce a través de tubos calentados externamente. Para el cambio a los tubos según la invención resulta por tanto más fácil de entender si se puede hacer una comparación con el tubo liso correspondiente al área de paso.

El diámetro equivalente $D_{\dot{A}_{qv}}$ resulta de la relación $D_{\dot{A}_{qv}} = 2 r_{\dot{A}_{qv}}$ del radio de la superficie interior que tendría un tubo liso no provisto de ranuras, cuya área de paso corresponde al área de paso del tubo según la invención. Si el área de paso $A_{\dot{A}_{qv}}$ del tubo liso ($A_{\dot{A}_{qv}} = \pi (r_{\dot{A}_{qv}})^2$) se establece igual al área de paso del tubo según la invención, el área de paso $A_{\dot{A}_{qv}}$ del tubo liso puede expresarse como sigue en los rasgos que caracterizan al tubo (los símbolos utilizados se refieren a una nomenclatura, como también se explica a modo de ejemplo en la Fig. 5):

$$|r_{\dot{A}_{qv}}| = \sqrt{\frac{|A_{\dot{A}_{qv}}|}{\pi}}$$

$$A_{\dot{A}_{qv}} = A_1 + N_T \cdot A_T$$

$$A_1 = \pi \cdot |r_1|^2$$

$$A_T = \left[|r_2| \cdot \frac{b_2}{2} - \frac{s \cdot (|r_2| - (|TT| + h))}{2} \right] - \left[|r_1| \cdot \frac{b_1}{2} - \frac{s \cdot (|r_1| - h)}{2} \right]$$

$$b_1 = 2 \cdot |r_1| \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_1|}} \right)$$

$$b_2 = 2 \cdot |r_2| \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_2|}} \right)$$

$$s = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}$$

$$h = \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}$$

El área de paso del tubo según la invención, equiparada al área de paso $A_{\dot{A}_{qv}}$ del tubo liso, está compuesta por el área de paso A_1 delimitada por la superficie interior en la que se han provisto las ranuras, que puede determinarse fácilmente a partir del radio de la superficie interior con $A_1 = \pi r_1^2$, y de las áreas adicionales provistas por el número de ranuras N_T de sus respectivas áreas de paso A_T .

Una vez resuelta la relación antes mencionada, el área de paso del tubo según la invención equiparada al área de paso $A_{\Delta qv}$ del tubo liso puede expresarse de la siguiente manera utilizando únicamente los rasgos que caracterizan al tubo (en lo sucesivo también se hará referencia mediante la fórmula (1)):

$$\begin{aligned}
 A_{\Delta qv} = & \pi \cdot |r_1|^2 + N_T \\
 & \cdot \left[\begin{aligned} & |r_2|^2 \\ & \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_2|}} \right) \\ & - \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \\ & \cdot \left(|r_2| - \left(|TT| + \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right) \right) \end{aligned} \right] \\
 & - \left[\begin{aligned} & |r_1|^2 \\ & \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_1|}} \right) \\ & - \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \\ & \cdot \left(|r_1| - \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right) \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

5 Según una segunda consideración de transferencia de calor, este valor característico puede expresarse como

$$\begin{aligned}
 & C1 + C2 \cdot |TT| + C3 \cdot VD + C4 \cdot |D_{\Delta qv}| \\
 & + (|TT| - C5) \cdot (VD - C6) \cdot C7 \\
 & + (|TT| - C5) \cdot (|D_{\Delta qv}| - C8) \cdot C9
 \end{aligned}$$

o, teniendo en cuenta otros enlaces cruzados, como

$$\begin{aligned}
 & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\dot{A}qv}| \\
 & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
 & + (|TT| - C5) * (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * C9 \\
 & + (VD - C6) * (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * C10 \\
 & + (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * C11
 \end{aligned}$$

en función del valor numérico $|D_{\dot{A}qv}|$ del diámetro equivalente $D_{\dot{A}qv}$, que depende del diámetro interior D_i medido en mm, del número N_T de ranuras y del valor numérico $|TT|$ de la profundidad de ranura TT de las ranuras medido en mm, así como de la densidad de ranura VD , que describe la relación de las ranuras N_T del tubo con respecto al número de referencia N_{ref} de las ranuras que pueden proporcionarse como máximo en la superficie interior de un tubo con el mismo diámetro equivalente $D_{\dot{A}qv}$ y una profundidad de ranura $TT = 1,3$ mm en porcentaje. Las constantes se definen como sigue

5 $C1 = 1946,066$

$C2 = 302,378$

$C3 = -2,178$

10 $C4 = 266,002$

$C5 = 1,954$

$C6 = 50,495$

$C7 = -2,004$

$C8 = 79,732$

15 $C9 = -1,041$

$C10 = 0,04631$

$C11 = -0,26550$

Se reconoció que, si se equiparan estos dos procedimientos de cálculo del valor característico, la relación

$$\begin{aligned}
 & P1 * |D_{\dot{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\dot{A}qv}| + P3 \\
 & = \\
 & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\dot{A}qv}| \\
 & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
 & + (|TT| - C5) * (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * C9
 \end{aligned}$$

20 o, teniendo en cuenta otros enlaces cruzados, la relación

$$\begin{aligned}
 & P1 * |D_{\dot{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\dot{A}qv}| + P3 \\
 & = \\
 & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\dot{A}qv}| \\
 & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
 & + (|TT| - C5) * (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * C9 \\
 & + (VD - C6) * (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * C10 \\
 & + (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * (|D_{\dot{A}qv}| - C8) * C11
 \end{aligned}$$

se obtiene como descripción de la relación entre los rasgos caracterizadores del tubo, que caracterizan un tubo que mejora la productividad del craqueo térmico de hidrocarburos en hornos tubulares con tubos calentados externamente. Los rasgos a usar concretamente para el tubo, que caracterizan el tubo, más precisamente

- 25
- el número N_T de ranuras introducidas en la superficie interior del tubo, que se extienden helicoidalmente alrededor del eje longitudinal a lo largo de la superficie interior,
 - el diámetro de la superficie interior en la que se han introducido las ranuras, en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal,
 - el radio r_2 de la base de las ranuras, cada una de las cuales tiene la forma de un arco circular en su base, en la sección transversal perpendicular al eje longitudinal, y
- 30

- la profundidad de ranura TT de las ranuras, que en la sección transversal perpendicular al eje longitudinal corresponde en cada caso a la distancia más pequeña entre el círculo con el diámetro D_i , en el que se encuentra la superficie interior y cuyo centro se encuentra en el eje longitudinal, y el punto más alejado de la base de ranura de la ranura desde el eje longitudinal,

5 pueden determinarse mediante iteraciones sencillas basadas en esta relación. Cualquier emparejamiento de estos cuatro rasgos característicos del tubo que satisfaga esta relación representa un tubo que mejora la productividad del craqueo térmico de hidrocarburos en hornos tubulares con tubos calentados externamente.

10 En la práctica, resulta que el esfuerzo para la iteración se reduce aún más en la práctica. Por ejemplo, las especificaciones para cada uno de los cuatro rasgos que caracterizan el tubo resultan de restricciones de rigidez o de fabricación o también del hecho de que el tubo debe diseñarse con una determinada área de paso.

15 Un posible peso máximo del tubo individual resultante de la instalación en la que se va a utilizar el tubo puede dar lugar a una restricción del grosor máximo de la pared del tubo, que a su vez da lugar a una restricción de la profundidad máxima de la ranura TT que se puede realizar desde el punto de vista de la rigidez. Las restricciones en el grosor de la pared (y, por tanto, en la profundidad máxima de ranura que puede representarse) también pueden resultar de otros aspectos, por ejemplo, de la transferencia de calor que debe conseguirse.

Las consideraciones de rigidez también pueden dar lugar a un límite superior para el número N_T de ranuras introducidas en la superficie interior del tubo y que se extienden helicoidalmente alrededor del eje longitudinal a lo largo de la superficie interior en combinación con la profundidad de ranura TT. Si se hacen demasiadas ranuras y demasiado profundas, la rigidez del tubo puede debilitarse demasiado.

20 La tendencia del tubo a coquizarse durante el craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en el que la mezcla de alimentación se introduce a través de los tubos calentados externamente, también puede dar lugar a límites con respecto al radio r_2 del arco circular de la base de la ranura en combinación con la profundidad de la ranura TT.

25 Además, aspectos de fabricación resultan en restricciones, por ejemplo, con respecto al radio r_2 del arco circular de la base de la ranura en combinación con la profundidad de la ranura TT. Las ranuras pueden, por ejemplo, producirse en un procedimiento de taladrado profundo, por ejemplo, de la manera descrita en la solicitud de patente alemana con el número de expediente 10 2016 012 907.7 solicitada por la solicitante y aún no publicada. Para producir las ranuras se utilizan plaquitas de corte. Estas plaquitas de corte están disponibles en tamaños fijos. Si -lo que se recomienda por razones de economía- se utilizan las plaquitas de corte ya disponibles y se prescinde de la opción -también concebible- de hacer fabricar plaquitas de corte específicamente para la fabricación del tubo específico, esto también da lugar a especificaciones para el radio r_2 del arco circular de la base de la ranura en combinación con la profundidad de la ranura TT. También puede resultar que un tubo con un primer número de ranuras pueda generarse más rápidamente y de forma significativamente más rentable que un tubo con un segundo número de ranuras mayor en relación con el primer número, de modo que esto también da lugar a una restricción en el número de ranuras que deben proporcionarse.

35 Las restricciones también pueden resultar del hecho de que se requiere un determinado caudal de mezcla de alimentación para el tubo y, por lo tanto, un área de paso mínima del tubo.

En consecuencia, antes de llevar a cabo la iteración, ya habrá zonas en las que no puedan localizarse algunos de los cuatro rasgos que caracterizan al tubo, por lo que podrán excluirse durante la iteración.

La relación descrita anteriormente

$$C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{Aqv}| \\ + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\ + (|TT| - C5) * (|D_{Aqv}| - C8) * C9$$

40 o la relación que tiene en cuenta otros enlaces cruzados

$$C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{Aqv}| \\ + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\ + (|TT| - C5) * (|D_{Aqv}| - C8) * C9 \\ + (VD - C6) * (|D_{Aqv}| - C8) * C10 \\ + (|D_{Aqv}| - C8) * (|D_{Aqv}| - C8) * C11$$

recurren a la densidad de ranuras VD. La densidad de ranuras VD es la relación de las ranuras N_T del tubo en relación con el número de referencia N_{ref} de las ranuras que se pueden realizar como máximo en la superficie interior de un tubo con el mismo diámetro equivalente D_{Aqv} con una profundidad de ranura TT = 1,3 mm en porcentaje.

45 El hallazgo según la invención puede aplicarse a tubos con un amplio espectro de diámetros D_i de la superficie interior en la que se proporcionan las ranuras. Obviamente, se pueden proporcionar más ranuras con un radio fijo r_2 del arco circular

en la base de la ranura y una profundidad de ranura fija TT en un tubo con un diámetro Di mayor que en un tubo con un diámetro Di menor. No obstante, para poder seguir especificando una relación para todos los diámetros, se ha desarrollado una normalización en la que ya no se utiliza el número real de ranuras N_T en la relación, sino la densidad de ranuras VD.

La densidad de ranuras VD - puesto que se expresa en porcentaje - resulta de la relación

$$5 \quad VD = N_T / N_{ref} * 100$$

en la cual el número de referencia N_{ref} es el mayor número natural para el que se cumple la relación

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{\bar{A}qv}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\bar{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\bar{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\bar{A}qv}|}} \right)}$$

en la que A_{qv} es el diámetro equivalente calculado a partir de la fórmula (1) y en la que

$$|r_{\bar{A}qv}| = \sqrt{\frac{|A_{\bar{A}qv}|}{\pi}}$$

10 y en la que es posible encontrar simultáneamente un rN_{ref} a determinar de forma iterativa, que cumpla las siguientes relaciones recurriendo al diámetro equivalente A_{qv} calculado mediante la fórmula (1) [en lo sucesivo también denominada fórmula (2):

$$\begin{aligned}
 & A_{\Delta qv} \\
 &= \pi \cdot |r_{Nref}|^2 + N_{ref} \\
 & \left[\begin{aligned} & |r_2|^2 \\ & \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{\left(2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right)}}{|r_2|} \right) \\ & - \sqrt{\left(2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right)} \\ & \cdot \left(|r_2| - \left(1,3 + \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right) \end{aligned} \right] \\
 & - \left[\begin{aligned} & |r_{Nref}|^2 \\ & \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{\left(2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right)}}{|r_1|} \right) \\ & - \sqrt{\left(2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right)} \\ & \cdot \left(|r_{Nref}| - \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

con las condiciones secundarias

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{\frac{2 \cdot |r_{Nref}}{|r_{Nref}|} \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{Nref}|}} \right), r_{Nref} < r_{\dot{A}qv}$$

N_{ref} puede determinarse fácilmente mediante la siguiente secuencia de pasos:

En un primer paso, el lado derecho de la relación

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsen \left(\frac{\sqrt{\frac{2 \cdot |r_{\dot{A}qv}}{|r_{\dot{A}qv}|} \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\dot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\dot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\dot{A}qv}|}} \right)}$$

- 5 se calcula con los valores del tubo para el que se va a comprobar si realiza las ventajas según la invención. Dado que N_{ref} debe ser un número natural, se toma el número natural correspondiente al valor calculado si el valor calculado es un número natural o el número natural inmediatamente inferior al valor calculado. Como ejemplo, tomemos un tubo con $D_i = 60$ mm, $TT = 2,05$ mm, $r_2 = 8$ mm y $N_T = 8$. Esto da como resultado $N_{ref} \leq 19,4967769$, lo que significa que se supone que N_{ref} es 19 en el primer paso.
- 10 En un segundo paso, se comprueba si el N_{ref} hallado en el primer paso puede utilizarse para hallar un r_{Nref} con el que pueda cumplirse la fórmula (2) utilizando el diámetro equivalente $A_{\dot{A}qv}$ calculado con la fórmula (1) sin violar la condición secundaria

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{\frac{2 \cdot |r_{Nref}}{|r_{Nref}|} \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{Nref}|}} \right), r_{Nref} < r_{\dot{A}qv}$$

- 15 $A_{\dot{A}qv}$ se calcula utilizando los valores del tubo para los que es necesario comprobar si realiza las ventajas según la invención utilizando la fórmula (1). Con los valores de ejemplo mencionados ($D_i = 60$ mm, $TT = 2,05$ mm, $r_2 = 8$ mm y $N_T = 8$), se obtiene un $A_{\dot{A}qv}$ de 2963,77397 mm² con los valores de ejemplo mencionados. Por consiguiente, en el segundo paso de la búsqueda de N_{ref} se comprueba si se puede encontrar un r_{Nref} con el N_{ref} encontrado en el primer paso, que el $A_{\dot{A}qv}$ calculado de esta manera cumple la fórmula (2) y al mismo tiempo se cumplen las condiciones secundarias mencionadas.
- 20 Esta iteración puede llevarse a cabo fácilmente utilizando un programa de hoja de cálculo, por ejemplo, Microsoft® Excel y la búsqueda de valores objetivo proporcionada en dichos programas de hoja de cálculo. Se toma una primera celda inicialmente vacía, que posteriormente se utiliza como "celda modificable" en la función de búsqueda de valor objetivo. Esta celda se llena con cualquier valor numérico, por ejemplo $|r_1|$. A continuación, se introduce en una segunda celda la ecuación mencionada para $A_{\dot{A}qv}$, que expresa $A_{\dot{A}qv}$ en r_{Nref} , en cuyo caso para r_{Nref} se hace referencia a la primera celda rellena con cualquier valor numérico, por ejemplo $|r_1|$, y el valor para r_2 se toma de los datos característicos del tubo para el que se va a comprobar si realiza las ventajas según la invención.

En una tercera celda se introduce la ecuación "= $A_{\dot{A}qv}$ - valor de la segunda celda", calculándose aquí el $A_{\dot{A}qv}$ mediante la fórmula (1).

En una cuarta celda, se introduce la ecuación

$$= \pi - N_{ref} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{N_{ref}}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{N_{ref}}|}} \right)$$

5 en la que $r_{N_{ref}}$ se refiere a la primera celda rellena con cualquier valor numérico, por ejemplo $|r_1|$, y el valor para r_2 se toma de los datos característicos del tubo para el que se va a comprobar si realiza las ventajas según la invención. En una quinta celda se inserta una prueba SI-ENTONCES, que emite la palabra "FALSO" si el valor de la cuarta celda es menor que cero y, en caso contrario, emite la palabra "VERDADERO".

10 Con la hoja de cálculo preparada de este modo, se puede iniciar la búsqueda del valor objetivo prevista en el programa de hoja de cálculo. La búsqueda del valor objetivo pregunta cuál es la celda objetivo. Para ello se especifica la tercera celda. La búsqueda del valor de destino también pregunta por el valor de destino. Éste se introduce como 0 (cero). La búsqueda del valor objetivo también pregunta por la celda modificable. Para ello se introduce la primera celda. La búsqueda del valor objetivo dará como resultado un valor en la primera celda. Si el contenido de la quinta celda de este valor es "VERDADERO", entonces el n_{ref} encontrado en el primer paso es el n_{ref} a utilizar. Si el valor de la quinta celda es "FALSO", el N_{ref} encontrado en el primer paso se reduce en el número 1 para formar un nuevo N_{ref} , que se utiliza para realizar de nuevo el segundo paso. Por regla general, esto da como resultado un valor en la primera celda al final de la búsqueda del valor objetivo que también contiene la palabra "VERDADERO" en la quinta celda, de modo que el nuevo N_{ref} obtenido de este modo es el N_{ref} que se va a utilizar. En caso contrario, se vuelve a reducir el nuevo N_{ref} en el número 1 y se realiza de nuevo el segundo paso. Se ha demostrado que incluso si la búsqueda de valores objetivo en un programa de hoja de cálculo no es perfecta en los decimales finales, esto no tiene una influencia notable en el diseño debido a las otras tolerancias.

20 Con el N_{ref} hallado de este modo, la densidad de ranura VD puede determinarse a partir de $VD = 100 \cdot N_T / N_{ref}$ para el tubo para el que se va a probar si realiza las ventajas según la invención. Si los valores así obtenidos muestran que

$$\begin{aligned} & P1 \cdot |D_{Aqv}|^2 + P2 \cdot |D_{Aqv}| + P3 \\ & = \\ & C1 + C2 \cdot |TT| + C3 \cdot VD + C4 \cdot |D_{Aqv}| \\ & + (|TT| - C5) \cdot (VD - C6) \cdot C7 \\ & + (|TT| - C5) \cdot (|D_{Aqv}| - C8) \cdot C9 \end{aligned}$$

o bajo la consideración de otros enlaces cruzados que

$$\begin{aligned} & P1 \cdot |D_{Aqv}|^2 + P2 \cdot |D_{Aqv}| + P3 \\ & = \\ & C1 + C2 \cdot |TT| + C3 \cdot VD + C4 \cdot |D_{Aqv}| \\ & + (|TT| - C5) \cdot (VD - C6) \cdot C7 \\ & + (|TT| - C5) \cdot (|D_{Aqv}| - C8) \cdot C9 \\ & + (VD - C6) \cdot (|D_{Aqv}| - C8) \cdot C10 \\ & + (|D_{Aqv}| - C8) \cdot (|D_{Aqv}| - C8) \cdot C11 \end{aligned}$$

25 entonces se confirma que el tubo con estos cuatro rasgos característicos del tubo (N_T , D_i , r_2 , TT) en los que se basa el cálculo mejora la productividad del craqueo térmico de hidrocarburos en hornos tubulares con tubos calentados externamente.

30 Con los valores de ejemplo anteriores ($D_i = 60$ mm, $TT = 2,05$ mm, $r_2 = 8$ mm y $N_T = 8$), el primer paso da como resultado un N_{ref} de 19. En el segundo paso, la búsqueda del valor objetivo con N_{ref} de 19 da como resultado un $r_{N_{ref}}$ de 29,4509992. En la cuarta celda, sin embargo, se obtiene el valor -0,07096658, por lo que se emite la palabra "FALSO" en la quinta celda. Si se reduce el N_{ref} de 19 en el número 1 a 18 y se vuelve a realizar el segundo paso, la búsqueda del valor objetivo con N_{ref} de 18 da como resultado un $r_{N_{ref}}$ de 29,5192908. Sin embargo, en la cuarta celda se obtiene el valor 0,10620948, de modo que en la quinta celda se emite la palabra "VERDADERO". $N_{ref} = 18$ tendría que utilizarse para el cálculo de la densidad de ranura VD cuando el tubo se someta a más pruebas de pertenencia a la invención.

El tubo según la invención se extiende a lo largo de un eje longitudinal y tiene ranuras introducidas en su superficie interior. El número de ranuras presentes se expresa mediante la variable N_T . Las ranuras se extienden helicoidalmente alrededor del eje longitudinal a lo largo de la superficie interior del tubo. En una forma de realización preferida, las ranuras están distribuidas uniformemente alrededor de la circunferencia del tubo. Esto significa que, en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal, la distancia en la dirección perimetral entre dos ranuras vecinas es la misma para todas las ranuras.

Por profundidad de la ranura se entiende la distancia del punto más profundo de la ranura desde la superficie interior. En una sección transversal perpendicular al eje longitudinal, esto significa la distancia más corta entre el punto más alejado (punto más profundo) de la ranura visto en la dirección radial desde el eje longitudinal y un círculo de superficie interior alrededor del eje longitudinal, en el que se encuentran las partes de la superficie interior dispuestas más hacia el interior y que permanecen entre las ranuras. Según la invención, se prevé que la superficie interior del tubo sea cilíndrica y que las ranuras se proporcionen en esta superficie interior cilíndrica. Partes de la superficie interior, que forman partes de un cilindro, quedan entonces entre las ranuras. El círculo de la superficie interior en el que se encuentran las partes de la superficie interior, que están dispuestas más hacia el interior es -ya que en esta forma de realización todas las partes restantes de la superficie interior están dispuestas igualmente hacia el interior- el círculo de la sección transversal en el que se encuentran las partes restantes de la superficie interior cilíndrica.

En particular, si en tal forma de realización la curvatura de la superficie de la ranura cambia de una curvatura cóncava en la base de la ranura (un arco de círculo en la base de la ranura) a una curvatura convexa de la superficie de la ranura en la región de la boca de la ranura, tales formas de realización pueden parecer como si las aletas dispuestas entre las ranuras (lo que significaría la zona de la ranura con curvatura cóncava) estuvieran conectadas a las aletas en la dirección perimetral (lo que significaría la zona con curvatura convexa) y pared que delimita la ranura (o, mejor, la base de la ranura con curvatura cóncava) pasa a ser una superficie exterior de la aleta. En tales formas de realización, el círculo de la superficie interior, en el que se encuentran las partes de la superficie interior dispuestas más hacia el interior, es el círculo de la sección transversal en el que se encuentran los vértices de las "aletas" en esta sección transversal. La profundidad de la ranura se expresa por la variable TT en la relación encontrada según la invención y que caracteriza el tubo.

En una forma de realización preferida, las ranuras tienen una sección transversal redondeada en un corte transversal perpendicular al eje longitudinal, al menos en la base de la ranura, que puede aproximarse preferentemente a través de un arco de círculo o corresponde a un arco de círculo. En la zona de la boca de la ranura, la geometría de la sección transversal de la ranura puede ensancharse en una forma de realización preferida, en particular cambiando desde una geometría de sección transversal cóncava en la base de la ranura hacia una geometría de sección transversal convexa en la zona de la boca de la ranura. En una forma de realización alternativa, la geometría de la sección transversal de toda la ranura puede ser aproximada a través de un arco circular o corresponde a un arco circular en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal. Del mismo modo, son concebibles formas de realización en las que la ranura tiene la geometría de sección transversal de parte de una elipse en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal. En una forma de realización preferida, la forma de la sección transversal de una ranura perpendicular al eje longitudinal sigue siendo la misma para todas las secciones transversales perpendiculares al eje longitudinal. En una forma de realización particularmente preferida, la forma y el tamaño de la sección transversal de una ranura perpendicular al eje longitudinal siguen siendo los mismos para todas las secciones transversales perpendiculares al eje longitudinal. En una forma de realización preferida, todas las ranuras del tubo en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal, preferiblemente en todas las secciones transversales perpendiculares al eje longitudinal, tienen la misma forma y, en particular, preferiblemente la misma forma y tamaño. Si las ranuras tienen diferentes tamaños y en particular diferentes profundidades de ranura, la profundidad de ranura TT de la ranura más profunda se utiliza para la relación que caracteriza el tubo según la invención.

En una forma de realización preferida, una sección transversal del tubo perpendicular al eje longitudinal es rotacionalmente simétrica con respecto al eje longitudinal. Esto significa que hay por lo menos un ángulo entre 0° y 360° sobre el cual la sección transversal del tubo puede ser proyectada sobre sí misma mediante rotación sobre el eje longitudinal.

En una forma de realización preferida, una sección transversal del tubo perpendicular al eje longitudinal es simétrica respecto al punto que el eje longitudinal asume en esta sección transversal.

En una forma de realización preferida, una sección transversal del tubo perpendicular al eje longitudinal es simétrica con respecto a un eje situado en esta sección transversal y que se extiende perpendicularmente al eje longitudinal.

En una sección transversal perpendicular al eje longitudinal, el tubo tiene un diámetro interior que se expresa mediante la variable D_i . El diámetro interior es el diámetro del círculo de la superficie interior, es decir, el círculo alrededor del eje longitudinal en el que se encuentran las partes de la superficie interior situadas más hacia el interior y que quedan entre las ranuras.

En una forma de realización preferida, la sección transversal interior del tubo tiene un diámetro D_i comprendido entre 15 mm y 280 mm, en particular preferentemente entre 15 mm y 180 mm, en particular preferentemente entre 20 mm y 150 mm y en particular preferentemente entre 30 mm y 140 mm.

ES 2 975 159 T3

En una forma de realización preferida, la profundidad de la ranura TT está comprendida entre 0,1 mm y 10 mm, en particular preferiblemente entre 1,0 mm y 7 mm y más preferiblemente entre 1,0 mm y 4 mm.

En una forma de realización preferida, el número de ranuras N_T está comprendido entre 1 y 100, en particular preferiblemente entre 2 y 50 y muy particularmente preferiblemente entre 2 y 30.

5 En una forma de realización preferida, la densidad de ranuras VD está comprendida entre 1% y 347%, más preferiblemente entre 2% y 113% y más preferiblemente entre 10% y 105%.

En una forma de realización preferida, las ranuras tienen un ángulo de 20° a 40°, preferiblemente de 22,5° a 32,5°, con respecto al eje longitudinal.

10 En una forma de realización preferida, en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal, el segmento de arco en el círculo de la superficie interior ocupado por una parte de la superficie interior dispuesta entre dos ranuras es superior al 1% del segmento de arco en el círculo de la superficie interior ocupado por la boca de la ranura de al menos una de las ranuras adyacentes a esta parte de la superficie interior, en particular superior al 2%, en particular superior al 5%, en particular superior al 10%, en particular superior al 30%, en particular superior al 50%, en particular superior al 70%. En una forma de realización preferida, el segmento de arco en el círculo de la superficie interior ocupado por la parte de la superficie interior dispuesta entre dos ranuras en una sección transversal es igual o mayor que el segmento de arco en el círculo de la superficie interior ocupado por la boca de la ranura de al menos una de las ranuras adyacentes a esta parte de la superficie interior.

Un dispositivo según la invención para el craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en el que la mezcla de alimentación se hace pasar a través de tubos calentados externamente, tiene al menos un tubo según la invención.

20 En el tubo según la invención, el suministro de calor inevitablemente diferente en la pared del tubo y en el interior del tubo a lo largo del perímetro del tubo entre los lados soleado y sombreado se iguala y el calor se disipa rápidamente hacia el interior, hacia la zona del núcleo. Esto reduce el riesgo de sobrecalentamiento localizado del gas de proceso en la pared del tubo y la consiguiente formación de coque. Además, la tensión térmica en el material del tubo es menor como resultado de la compensación de temperatura entre los lados soleado y sombreado, lo que conduce a una vida útil más larga. Por último, el tubo según la invención también da lugar a una temperatura más uniforme en toda la sección transversal del tubo, lo que se traduce en un mejor rendimiento de la olefina. Esto se debe a que, sin la compensación radial de la temperatura en el interior del tubo según la invención, se produciría un agrietamiento excesivo en la pared caliente del tubo y la conversión de la reacción en el centro del tubo sería demasiado baja.

30 Dependiendo del material, el tubo según la invención puede fabricarse, por ejemplo, a partir de un tubo fundido centrífugamente retorciendo los extremos de un tubo con ranuras paralelas al eje uno hacia el otro, o generando el perfil interior preformando un tubo fundido centrífugamente, por ejemplo, mediante forja en caliente, estirado en caliente o conformado en frío por medio de una herramienta de perfil, por ejemplo, un mandril volante o una barra de mandril con un perfil exterior correspondiente al perfil interior del tubo.

35 Las máquinas de corte para el perfilado interior de tubos se conocen en diferentes variantes, por ejemplo, por la especificación de patente alemana 195 23 280. Estas máquinas también son adecuadas para fabricar un tubo según la invención.

La superficie interior del tubo según la invención debe tener la menor rugosidad posible; por lo tanto, se puede alisar, por ejemplo, pulir mecánicamente o nivelar electrolíticamente.

40 Los materiales de tubería adecuados para su uso en plantas de etileno son aleaciones de níquel-cromo-hierro con 0,1% a 0,5% de carbono, 20% a 35% de cromo, 20% a 70% de níquel, hasta 3% de silicio, hasta 1% de niobio, hasta 5% de tungsteno y adiciones de hafnio, titanio, tierras raras o circonio, en cada caso hasta 0,5% y hasta 6% de aluminio.

Para el tubo en particular se prefiere una aleación de níquel-cromo-hierro con alta resistencia a la oxidación y a la carburación, resistencia a la rotura por fluencia y resistencia a la fluencia compuesta por

0,05% a 0,6% de carbono

45 20% a 50% de cromo

5% a 40% de hierro

hasta el 6% de aluminio

hasta el 2% de silicio

hasta el 2% de manganeso

50 hasta el 1,5% de niobio

ES 2 975 159 T3

hasta el 1,5% de tantalio

hasta el 6,0% de wolframio

hasta el 1,0% de titanio

hasta el 1,0% de circonio

5 hasta el 0,5% de itrio

hasta el 0,5% de cerio

hasta el 0,5% de molibdeno

hasta el 0,1% de nitrógeno

y el resto es níquel, incluidas las impurezas debidas a la fusión.

- 10 La siguiente tabla muestra posibles formas de realización de la invención que corresponden a la relación propuesta según la invención. En este caso se indica un emparejamiento de N_{TMax} y TT_{min} y VD_{max} en un renglón para un diámetro interior seleccionado $D_{\bar{A}qv}$ para una buena, pero menor transferencia de calor en relación con un segundo emparejamiento de N_{TMin} y TT_{Max} y VD_{min} . Además, la tabla muestra una transferencia de calor estimada con un programa de simulación ($H_{min}(D_{\bar{A}qv}, TT_{min}, VD_{Max})$ [vatios]) para la transferencia de calor inferior; $H_{max}(D_{\bar{A}qv}, TT_{max}, VD_{min})$ [vatios]) para la transferencia de calor aún mejor).
- 15

No.	$D_{\bar{A}qv}$	N_{Tmax}	V_{Dmax}	TT_{min}	$H_{min}(D_{\bar{A}qv}, TT_{min}, VD_{max})$ [vatios]
1	35	9	100	1.3	10831.95559
2	40	11	100	1.3	12288.96106
3	45	12	100	1.3	13732.69121
4	50	14	100	1.3	15163.14603
5	55	16	100	1.3	16580.32553
6	60	18	100	1.3	17984.2297
7	65	20	100	1.3	19374.85855
8	70	21	100	1.3	20752.21208
9	75	23	100	1.3	22116.29028
10	80	25	100	1.3	23467.09315
11	85	27	100	1.3	24804.62071
12	90	29	100	1.3	26128.87294
13	95	30	100	1.3	27439.84984
14	100	32	100	1.3	28737.55142
15	105	34	100	1.3	30021.97768
16	110	36	100	1.3	31293.12861
17	115	38	100	1.3	32551.00422
18	120	39	100	1.3	33795.6045
19	125	41	100	1.3	35026.92946
20	130	43	100	1.3	36244.9791
21	135	45	100	1.3	37449.75341
22	140	47	100	1.3	38641.25239
23	160	54	100	1.3	43274.4951
24	180	61	100	1.3	47695.33262
25	200	68	100	1.3	51903.76496
26	280	97	100	1.3	66613.44243

ES 2 975 159 T3

No.	$D_{\dot{A}qv}$	N_{Tmax}	V_{Dmax}	TT_{min}	$H_{min}(D_{\dot{A}qv}, TT_{min}, VD_{max})$ [vatios]
27	35	3	33.33333333	2.7	11564.65262
28	40	3	27.27272727	2.7	13032.35209
29	45	3	25	2.7	14463.96054
30	50	3	21.42857143	2.7	15887.80079
31	55	3	18,75	2.7	17292.40888
32	60	3	16.66666667	2.7	18679.77042
33	65	3	15	2.7	20051.07678
34	70	3	14.28571429	2.7	21404.40771
35	75	3	13.04347826	2.7	22746.18795
36	80	3	12	2.7	24073.38983
37	85	3	11.11111111	2.7	25386.30292
38	90	3	10.34482759	2.7	26685.1369
39	95	3	10	2.7	27969.09023
40	100	3	9.375	2.7	29240.37497
41	105	3	8.823529412	2.7	30497.91084
42	110	3	8.333333333	2.7	31741.77677
43	115	3	7.894736842	2.7	32972.03508
44	120	3	7.692307692	2.7	34188.38764
45	125	3	7.317073171	2.7	35391.6438
46	130	3	6.976744186	2.7	36581.40387
47	135	3	6.666666667	2.7	37757.6973
48	140	3	6.382978723	2.7	38920.54851
49	160	3	5.555555556	2.7	43437.89962
50	180	3	4.918032787	2.7	47741.49693
51	200	3	4.411764706	2.7	51831.75693
52	280	3	3.092783505	2.7	66063.32146

5 Se comprobó que la transferencia de calor esperada puede representarse gráficamente de forma directamente proporcional al diámetro interno tanto para el valor bueno ($H_{min}(D_{\dot{A}qv}, TT_{min}, VD_{Max})$ [vatios]), que es algo inferior al valor optimizado adicional ($H_{Max}(D_{\dot{A}qv}, TT_{max}, VD_{min})$ [vatios]), como para el valor optimizado adicional ($H_{Max}(D_{\dot{A}qv}, TT_{max}, VD_{min})$ [vatios]), como se muestra en la Fig. 4. La tabla siguiente muestra los valores de las distintas variables de las relaciones utilizadas según la invención para los tubos individuales. El arco circular en la base de la ranura tenía un radio r^2 de 8 mm.

No.	$A_{\dot{A}qv}$	A_1	A_T	r_1	b_1	b_2	s	h
1	962.113	870.691	10.158	16.648	11.365	12.331	11.146	0.961
2	1256.637	1149.789	9.713	19.131	10.883	11.77	10.737	0,769
3	1590.431	1477.643	9.399	21.688	10.543	11.374	10.44	0,638
4	1963.495	1835.026	9.176	24.168	10.303	11.093	10.226	0.547
5	2375.829	2231.74	9.006	26.653	10.12	10.878	10.059	0,479
6	2827.433	2667.765	8.87	29.141	9.975	10.708	9.927	0,426
7	3318.307	3143.09	8.761	31,63	9.858	10.57	9.818	0.383
8	3848.451	3666.405	8.669	34.162	9.76	10.455	9.727	0.348
9	4417.865	4220.229	8.593	36.652	9.679	10.359	9.65	0.319
10	5026.548	4813.348	8.528	39.143	9.609	10.278	9.585	0,295

ES 2 975 159 T3

No.	$A_{\bar{A}qv}$	A_1	A_T	r_1	b_1	b_2	s	h
11	5674.502	5445.756	8.472	41.635	9.55	10.207	9.529	0,274
12	6361.725	6117.451	8.423	44.128	9.498	10.146	9.48	0.255
13	7088.218	6836.823	8.38	46,65	9.452	10.092	9.436	0,239
14	7853.982	7587.043	8.342	49.143	9.411	10.044	9.397	0.225
15	8659.015	8376.545	8.308	51.637	9.375	10.001	9.362	0.213
16	9503.318	9205.329	8.277	54.131	9.343	9.963	9.331	0.201
17	10386.891	10073.393	8.25	56.626	9.314	9.928	9.303	0,191
18	11309.734	10988.968	8.225	59.143	9.287	9.897	9.278	0,182
19	12271.846	11935.564	8.202	61.638	9.263	9.868	9.254	0,174
20	13273.229	12921.438	8.181	64.133	9.241	9.842	9.233	0,166
21	14313.882	13946.589	8.162	66.628	9.221	9.818	9.213	0,159
22	15393.804	15011.017	8.144	69.124	9.202	9.796	9.195	0.153
23	20106.193	19669.568	8.086	79.127	9.14	9.722	9.135	0,132
24	25446.9	24956.406	8.041	89.128	9.092	9.666	9.088	0.116
25	31415.927	30871.542	8.006	99,13	9.055	9.621	9.052	0.103
26	61575.216	60807.235	7.917	139.124	8.962	9.511	8,96	0,072
27	962.113	877.692	28.14	16.715	14.619	17.379	14.158	1.573
28	1256.637	1175.212	27.142	19.341	14.145	16.706	13.832	1.279
29	1590.431	1511.08	26,45	21.932	13,82	16.241	13.592	1.08
30	1963.495	1885.673	25.941	24,5	13.582	15.899	13.409	0.935
31	2375.829	2299.186	25.548	27.053	13.4	15.636	13.263	0,825
32	2827.433	2751.727	25.236	29.596	13.255	15.426	13.145	0,739
33	3318.307	3243.365	24.981	32.131	13.138	15.256	13.047	0,669
34	3848.451	3774.144	24.769	34,66	13.041	15.114	12.964	0,612
35	4417.865	4344.095	24,59	37.186	12.959	14.994	12.894	0.563
36	5026.548	4953.239	24.437	39.707	12.889	14.891	12.833	0.522
37	5674.502	5601.591	24.304	42.226	12.829	14.802	12.779	0,486
38	6361.725	6289.163	24.187	44.743	12.776	14.724	12.732	0.455
39	7088.218	7015.965	24.085	47.257	12.729	14.656	12.691	0.428
40	7853.982	7782.002	23.993	49,77	12.688	14.595	12.653	0.404
41	8659.015	8587.28	23.912	52.282	12.651	14.54	12.62	0.382
42	9503.318	9431.804	23.838	54.793	12.617	14.491	12.589	0.363
43	10386.891	10315.577	23.771	57.302	12.587	14.446	12.562	0.345
44	11309.734	11238.601	23.711	59.811	12.56	14.406	12.537	0,329
45	12271.846	12200.88	23.656	62.319	12.535	14.369	12.514	0.315
46	13273.229	13202.415	23.605	64.826	12.512	14.335	12.493	0.302
47	14313.882	14243.208	23.558	67.333	12.491	14.304	12.473	0,289
48	15393.804	15323.26	23.515	69.839	12.472	14.275	12.455	0,278
49	20106.193	20036.081	23.371	79,86	12.407	14.178	12.394	0,241,
50	25446.9	25377.119	23.26	89.877	12.357	14.105	12.347	0.212
51	31415.927	31346.407	23.173	99.889	12.318	14.046	12.31	0,19
52	61575.216	61506.358	22.953	139.922	12.22	13.899	12.216	0.133

ES 2 975 159 T3

Las siguientes condiciones de simulación fueron utilizadas para el análisis CFD (Computational Fluid Dynamics analysis) utilizado para estimar los valores ($H_{\min}(D_{Aqv}, TT_{\min}, VD_{Max})$ [vatios]) y $H_{Max}(D_{Aqv}, TT_{\max}, VD_{\min})$ [vatios]:

Condiciones límite para la simulación de la transferencia de calor:

5 Temperatura del espacio para el calentamiento externo de los tubos: 1300 °C

Emisividad ϵ de los tubos: 0,85

Consideración de los lados sol/sombra (lado soleado: 80% radiación 20% convección; lado sombreado: 20% radiación 80% convección) así como las propiedades físicas del material densidad, capacidad calorífica específica y conductividad térmica en función de la temperatura

10 Longitud de la simulación: 2 m

Tabla 1: Estado de la mezcla de alimentación a la entrada del tubo

Parámetro	Valor
Temperatura, °C	621
Presión, bares	2
Caudal másico específico del área, g/(s·m ²)	52912,8

Tabla 2: Propiedades físicas de la mezcla de alimentación

Temperatura °C	Densidad kg/m ³	Capacidad calorífica específica kJ/kgK	Viscosidad dinámica kg/ms	Conductividad térmica W/mK
620	0.87467615	2.81553015	2.941481E-05	0.08947538
630	0.86669998	2.82698110	2.974235E-05	0.09122076
640	0.85872380	2.83843205	3.006989E-05	0.09296613
650	0.85074763	2.84988300	3.039743E-05	0.09471151
660	0.84277145	2.86133395	3.072497E-05	0.09645688
670	0.83479528	2.87278490	3.105251E-05	0.09820226
680	0.82681910	2.88423585	3.138005E-05	0.09994763
690	0.81884293	2.89568680	3.170759E-05	0.10169301
700	0.81086675	2.90713775	3.203513E-05	0.10343838
710	0.80289058	2.91858870	3.236268E-05	0.10518376
720	0.79491440	2.93003965	3.269022E-05	0.10692913
730	0.78693823	2.94149060	3.301776E-05	0.10867451
740	0.77896205	2.95294155	3.334530E-05	0.11041988
750	0.77098588	2.96439250	3.367284E-05	0.11216526
760	0.76300970	2.97584345	3.400038E-05	0.11391063
770	0.75503353	2.98729440	3.432792E-05	0.11565601
780	0.74705735	2.99874535	3.465546E-05	0.11740138
790	0.73908118	3.01019630	3.498300E-05	0.11914676
800	0.73110500	3.02164725	3.531055E-05	0.12089213
810	0.72312883	3.03309820	3.563809E-05	0.12263751
820	0.71515265	3.04454915	3.596563E-05	0.12438288
830	0.70717648	3.05600010	3.629317E-05	0.12612826
840	0.69920030	3.06745105	3.662071E-05	0.12787363

Temperatura °C	Densidad kg/m ³	Capacidad calorífica específica kJ/kgK	Viscosidad dinámica kg/ms	Conductividad térmica W/mK
850	0.69122413	3.07890200	3.694825E-05	0.12961901

El tubo según la invención se utiliza preferentemente para el craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en el que la mezcla de alimentación pasa a través de tubos calentados externamente.

5 A continuación, la invención se explica en más detalle con referencia a un dibujo que simplemente ilustra formas de realización de la invención. En este se muestra:

Fig. 1 una vista en perspectiva de un tubo según la invención,

Fig. 2 una posible sección transversal de un tubo según la invención en un plano de sección perpendicular al eje longitudinal del tubo,

10 Fig. 3 una sección transversal de un tubo no perteneciente a la invención en un plano de sección perpendicular al eje longitudinal del tubo,

Fig. 4 un diagrama que muestra, para un emparejamiento de números N_T de ranuras y profundidades de ranuras TT que conduce a buenos resultados y para un emparejamiento de números N_T de ranuras y profundidades de ranuras TT que conduce a resultados aún mejores, la dependencia de la transferencia de calor conseguida con este emparejamiento con respecto al diámetro interior, y

15 Fig. 5 una sección transversal a través de un tubo según la invención con una ranura.

El tubo 1 según la invención mostrado en la Fig. 1 se extiende a lo largo de un eje longitudinal A y tiene un número de 3 ranuras 2 introducidas en la superficie interior y que se extienden helicoidalmente alrededor del eje longitudinal A a lo largo de la superficie interior.

20 En la sección transversal del tubo 1 según la invención mostrada en la Fig. 2, puede verse que, según una forma de realización preferida, las ranuras 2 se proporcionan en la superficie interior del tubo 1, que por lo demás es cilíndrica. Partes de la superficie interior cilíndrica del tubo 1 permanecen así entre las ranuras 2.

La Fig. 2 muestra la profundidad de la ranura TT y el diámetro D_i , así como el círculo de la superficie interior 3.

La Fig. 2 también muestra que la sección transversal de las ranuras 2 puede representarse mediante un arco de círculo.

25 En la sección transversal de un tubo 1 mostrada en la Fig. 3, puede verse que, en una forma de realización no perteneciente a la invención, las ranuras diseñadas de manera cóncava en la base de la ranura 4 pueden pasar a ser convexas en la dirección de la boca de la ranura 5 y que la parte de la superficie interior que queda entre dos ranuras 2 se contrae casi hasta una línea. La fig. 3 muestra la profundidad de la ranura TT y el diámetro D_i y el círculo de la superficie interior 3.

30 La Fig. 4 muestra los valores indicados en la tabla para ($H_{\min}(D_{\text{Áqv}}, TT_{\min}, VD_{\text{Max}})$ [vatios]) y $H_{\text{Max}}(D_{\text{Áqv}}, TT_{\text{max}}, VD_{\min})$ [vatios]) en función del diámetro equivalente $D_{\text{Áqv}}$. Puede observarse que cada uno de estos valores puede representarse mediante una línea.

La Fig. 5 y el detalle Y mostrado en la Fig. 5 ilustran la nomenclatura de las abreviaturas A_1 , r_1 , TT, h, b_2 , b_1 , AT, r_2 y s utilizadas en las reivindicaciones y en esta descripción para un tubo con una ranura según la invención.

En los siguientes ejemplos se muestra cómo pueden hallarse los cuatro valores que caracterizan el tubo N_T , D_i , r_2 y TT.

35 En un ejemplo, existe el requisito externo de que el área de paso corresponda a la de un tubo liso de 60 mm de diámetro. Además, las herramientas que pueden utilizarse para fabricar el tubo imponen la restricción de fabricación de que debe seleccionarse una profundidad de ranura TT de 1,3 mm y un radio r_2 del arco circular de la base de la ranura de 8 mm para ranuras con sección transversal de arco circular. La cuestión es con qué diámetro D_i y con qué número de ranuras se puede mejorar la productividad del craqueo térmico de hidrocarburos en hornos tubulares con tubos calentados externamente.

Por lo tanto, el punto de partida es:

$$D_{\text{Áqv}} = 60 \text{ mm}$$

$$A_{\text{Áqv}} = \pi (60/2)^2 = 2827,43 \text{ mm}^2$$

$$TT = 1,3 \text{ mm}$$

45 $r_2 = 8 \text{ mm}$

A_{Aqv} da como resultado inmediato $r_{Aqv} = D_{Aqv}/2 = 30 \text{ mm}$

A partir de r_2, r_{Aqv} , para determinar el N_{ref} en el primer paso mediante la fórmula

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{Aqv}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Aqv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Aqv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{Aqv}|}} \right)}$$

5 se obtiene un primer N_{ref} de 18. Con este N_{ref} de 18 la búsqueda del valor objetivo descrita anteriormente da como resultado un r_{Nref} de 29,1406241, que también cumple la condición secundaria

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{Nref}|}} \right), r_{Nref} < r_{Aqv}$$

Por lo tanto, se utilizará el número 18 como N_{ref} .

Con $N_{ref} = 18$, el resultado es $VD = N_T/18 * 100$.

Sustituyendo los valores mínimos de P1, P2 y P3 para el término izquierdo de la ecuación

$$\begin{aligned} & P1 * |D_{Aqv}|^2 + P2 * |D_{Aqv}| + P3 \\ & = \\ & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{Aqv}| \\ & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\ & + (|TT| - C5) * (|D_{Aqv}| - C8) * C9 \\ & + (VD - C6) * (|D_{Aqv}| - C8) * C10 \\ & + (|D_{Aqv}| - C8) * (|D_{Aqv}| - C8) * C11 \end{aligned}$$

10

con las constantes

C1 = 1946,066

C2 = 302,378

C3 = -2,178

15

C4 = 266,002

C5 = 1,954

C6 = 50,495

C7 = -2,004

C8 = 79,732

20

C9 = -1,041

C10 = 0,04631

C11 = -0,26550

-0,2 ≥ P1 ≥ -0,3

310 ≤ P2 ≤ 315

$$200 \leq P3 \leq 1500$$

se obtiene el valor

$$P1 * |D_{Aqv}|^2 + P2 * |D_{Aqv}| + P3 = -0,3 * (60)^2 + 310 * 60 + 200 = 17.720$$

y al insertar los valores máximos de P1, P2 y P3 para el término izquierdo de la ecuación se obtiene

5
$$P1 * |D_{Aqv}|^2 + P2 * |D_{Aqv}| + P3 = -0,2 * (60)^2 + 315 * 60 + 1500 = 19.680$$

Para el término derecho de la ecuación

$$\begin{aligned} & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{Aqv}| \\ & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\ & + (|TT| - C5) * (|D_{Aqv}| - C8) * C9 \\ & + (VD - C6) * (|D_{Aqv}| - C8) * C10 \\ & + (|D_{Aqv}| - C8) * (|D_{Aqv}| - C8) * C11 \end{aligned}$$

después de insertar $|TT| = 1,3$ y $|D_{Aqv}| = 60$ se obtiene

$$\begin{aligned} & 1946,066 + 302,378 * 1,3 + -2,178 * VD + 266,002 * 60 \\ & + (1,3 - 1,954) * (VD - 50,495) * -2,004 \\ & + (1,3 - 1,954) * (60 - 79,732) * -1,041 \\ & + (VD - 50,495) * (60 - 79,732) * 0,04631 \\ & + (60 - 79,732) * (60 - 79,732) * -0,26550 \end{aligned}$$

10 por consiguiente

$$18162.4329 - 1.7812 VD$$

y con $VD = N_T / N_{ref} * 100 = N_T / 18 * 100 = 5,5556 N_T$ se obtiene

$$18162,4329 - 9,8954 N_T$$

15 Para asegurar que el tubo alcance las ventajas según la invención, N_T debe seleccionarse de forma que se cumpla la relación

$$19.680 \geq 18162,4329 - 9,8954 N_T$$

y la relación

$$18162,4329 - 9,8954 N_T \geq 17.720$$

Ambas relaciones se cumplirían con $1 \leq N_T \leq 44,71$.

20 Dado que el N_T hallado de este modo es mayor que el valor N_{ref} calculado previamente, el resultado es que incluso si se introduce el máximo número posible de ranuras ($N_{ref} = 18$) a esta profundidad de ranura, todavía se pueden conseguir las ventajas según la invención. En este ejemplo de realización, el usuario es por tanto libre de equipar el tubo hasta el máximo número posible de ranuras sin perder las ventajas de la invención.

25 Con el N_T hallado de este modo, el radio r_1 del tubo y, por tanto, el diámetro interior $Di (= 2 r_1)$ del tubo pueden determinarse iterativamente mediante la fórmula (1), ya que $A_{Aqv} = 2827,43 \text{ mm}^2$.

Por consiguiente, pueden determinarse todos los parámetros necesarios para la fabricación del tubo que realiza las ventajas de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Tubo para craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en el que la mezcla de alimentación pasa a través de tubos calentados externamente, en cuyo caso

5 • el tubo (1) se extiende a lo largo de un eje longitudinal (A) y tiene un número de ranuras N_T (2) introducidas en la superficie interior del tubo (1) y que se extienden helicoidalmente alrededor del eje longitudinal (A) a lo largo de la superficie interior,

• la superficie interior, en la que se han introducido las ranuras (2), tiene un diámetro D_i medido en milímetros y un radio $r_1 = D_i/2$ medido en milímetros en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal (A),

10 • las ranuras (2) en la sección transversal perpendicular al eje longitudinal (A) tienen cada una la forma de un arco circular en su base de ranura (4) y el arco circular tiene un radio r_2 medido en milímetros,

las ranuras (2) tienen respectivamente una profundidad de ranura TT que, en la sección transversal perpendicular al eje longitudinal (A), corresponde en cada caso a la distancia más pequeña entre el círculo con el diámetro D_i en el que se encuentra la superficie interior y cuyo centro se encuentra en el eje longitudinal (A), y el punto más alejado de la base de ranura (4) de la ranura (2) del eje longitudinal (A), caracterizado porque,

15 el valor numérico $|D_{Aqv}|$ de un diámetro equivalente D_{Aqv} y el número N_T de las ranuras (2) y el valor numérico |TT| de la profundidad de ranura TT, medida en mm, de las ranuras (2) cumplen la relación

$$\begin{aligned}
 & P1 * |D_{Aqv}|^2 + P2 * |D_{Aqv}| + P3 \\
 & = \\
 & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{Aqv}| \\
 & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
 & + (|TT| - C5) * (|D_{Aqv}| - C8) * C9
 \end{aligned}$$

con las constantes

C1 = 1946,066

20 C2 = 302,378

C3 = -2,178

C4 = 266,002

C5 = 1,954

C6 = 50,495

25 C7 = -2,004

C8 = 79,732

C9 = -1,041

-0,2 ≥ P1 ≥ -0,3

310 ≤ P2 ≤ 315

30 200 ≤ P3 ≤ 1500

en cuyo caso la densidad de ranuras VD, que describe la relación entre las ranuras N_T del tubo con respecto al número de referencia N_{ref} del número máximo de ranuras que pueden introducirse en la superficie interior de un tubo del mismo diámetro equivalente D_{Aqv} con una profundidad de ranura TT = 1,3 mm en por ciento, resulta de la relación siguiente:

$$VD = N_T / N_{ref} * 100$$

35 y el número de referencia N_{ref} es el mayor número natural que cumple la relación

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{\lambda qv}} \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\lambda qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\lambda qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\lambda qv}|}} \right)}$$

donde

$$|r_{\lambda qv}| = \sqrt{\frac{|A_{\lambda qv}|}{\pi}}$$

$$A_{\lambda qv} = A_1 + N_T \cdot A_T$$

$$A_1 = \pi \cdot |r_1|^2$$

5

$$A_T = \left[|r_2| \cdot \frac{b_2}{2} - \frac{s \cdot (|r_2| - (|TT| + h))}{2} \right] - \left[|r_1| \cdot \frac{b_1}{2} - \frac{s \cdot (|r_1| - h)}{2} \right]$$

$$b_1 = 2 \cdot |r_1| \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_1|}} \right)$$

$$b_2 = 2 \cdot |r_2| \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_2|}} \right)$$

$$s = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}$$

$$h = \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}$$

10 y para la que existe un r_{Nref} que, recurriendo al valor de $A_{\lambda qv}$ determinado mediante la relación anterior, cumple las siguientes relaciones, según las cuales $A_{\lambda qv}$ es también

$$\begin{aligned}
 & A_{Aqu} \\
 &= \pi \cdot |r_{Nref}|^2 + N_{ref} \\
 & \cdot \left[\left[|r_2|^2 \right. \right. \\
 & \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{\left(2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right)}}{|r_2|} \right) \\
 & - \sqrt{\left(2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right)} \\
 & \cdot \left(|r_2| - \left(1,3 + \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right) \\
 & - \left[|r_{Nref}|^2 \right. \\
 & \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{\left(2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right)}}{|r_1|} \right) \\
 & - \sqrt{\left(2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right)} \\
 & \cdot \left(|r_{Nref}| - \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \left. \right]
 \end{aligned}$$

sin violar las condiciones secundarias

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{\frac{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{Nref}|}} \right), \tau_{Nref} < r_{\lambda qv}$$

y en donde el diámetro equivalente $D_{\lambda qv}$ resulta de la relación $D_{\lambda qv} = 2 r_{\lambda qv}$, en donde la superficie interior del tubo es cilíndrica y las ranuras se introducen en esta superficie interior cilíndrica de manera que partes de la superficie interior, que forman partes de un cilindro, quedan entre las ranuras.

5 2. Tubo para el craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en el que la mezcla de alimentación pasa a través de tubos calentados externamente, en cuyo caso

- el tubo (1) se extiende a lo largo de un eje longitudinal (A) y tiene un número de ranuras N_T (2) introducidas en la superficie interior del tubo (1) y que se extienden helicoidalmente alrededor del eje longitudinal (A) a lo largo de la superficie interior,

10 • la superficie interior, en la que se han introducido las ranuras (2), tiene un diámetro D_i medido en milímetros y un radio $r_1 = D_i/2$ medido en milímetros en una sección transversal perpendicular al eje longitudinal (A),

- las ranuras (2) en la sección transversal perpendicular al eje longitudinal (A) tienen cada una la forma de un arco de círculo en su base de ranura (4) y el arco de círculo tiene un radio r_2 medido en milímetros,

15 las ranuras (2) tienen respectivamente una profundidad de ranura TT que, en la sección transversal perpendicular al eje longitudinal (A), corresponde en cada caso a la distancia más pequeña entre el círculo con el diámetro D_i en el que se encuentra la superficie interior y cuyo centro se encuentra en el eje longitudinal (A), y el punto más alejado de la base de ranura (4) de la ranura (2) del eje longitudinal (A), caracterizado por que

el valor numérico $|D_{\lambda qv}|$ de un diámetro equivalente $D_{\lambda qv}$ y el número N_T de las ranuras (2) y el valor numérico $|TT|$ de la profundidad de ranura TT , medida en mm, de las ranuras (2) cumplen la relación

$$\begin{aligned} & P1 * |D_{\lambda qv}|^2 + P2 * |D_{\lambda qv}| + P3 \\ & = \\ & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\lambda qv}| \\ & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\ & + (|TT| - C5) * (|D_{\lambda qv}| - C8) * C9 \\ & + (VD - C6) * (|D_{\lambda qv}| - C8) * C10 \\ & + (|D_{\lambda qv}| - C8) * (|D_{\lambda qv}| - C8) * C11 \end{aligned}$$

20 con las constantes

C1 = 1946,066

C2 = 302,378

C3 = -2,178

25 C4 = 266,002

C5 = 1,954

C6 = 50,495

C7 = -2,004

C8 = 79,732

30 C9 = -1,041

C10 = 0,04631

C11 = -0,26550

-0,2 ≥ P1 ≥ -0,3

$$310 \leq P2 \leq 315$$

$$200 \leq P3 \leq 1500$$

5 donde la densidad de ranuras VD, que describe la relación entre las ranuras N_T del tubo con respecto al número de referencia N_{ref} del número máximo de ranuras que pueden introducirse en la superficie interior de un tubo del mismo diámetro equivalente $D_{\dot{A}qv}$, con una profundidad de ranura $TT = 1,3$ mm en por ciento, resulta de la siguiente relación:

$$VD = N_T / N_{ref} \cdot 100$$

y el número de referencia N_{ref} es el mayor número natural que cumple la relación

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{\dot{A}qv}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\dot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\dot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\dot{A}qv}|}} \right)}$$

donde

$$|r_{\dot{A}qv}| = \sqrt{\frac{|A_{\dot{A}qv}|}{\pi}}$$

10

$$A_{\dot{A}qv} = A_1 + N_T \cdot A_T$$

$$A_1 = \pi \cdot |r_1|^2$$

$$A_T = \left[|r_2| \cdot \frac{b_2}{2} - \frac{s \cdot (|r_2| - (|TT| + h))}{2} \right] - \left[|r_1| \cdot \frac{b_1}{2} - \frac{s \cdot (|r_1| - h)}{2} \right]$$

$$b_1 = 2 \cdot |r_1| \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_1|}} \right)$$

$$b_2 = 2 \cdot |r_2| \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_2|}} \right)$$

$$s = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}$$

15

$$h = \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}$$

y para el que existe un r_{Nref} que, recurriendo al valor de A_{Aqv} determinado mediante la relación anterior, cumple las siguientes relaciones, según las cuales A_{Aqv} es también

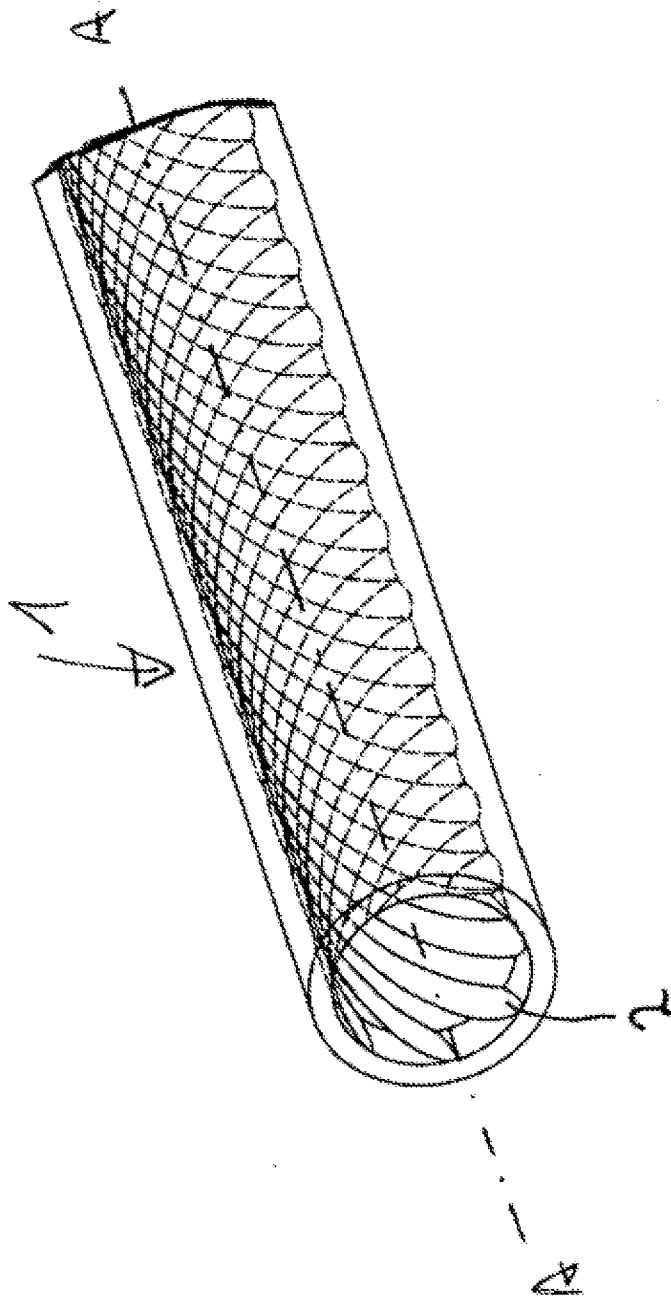
$$\begin{aligned} & A_{Aqv} \\ &= \pi \cdot |r_{Nref}|^2 + N_{ref} \\ & \cdot \left[\left[|r_2|^2 \right. \right. \\ & \cdot \arcsen \left(\frac{\left(\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right)}{|r_2|} \right) \right. \\ & - \left. \left[\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right. \right. \\ & \cdot \left. \left(|r_2| - \left(1,3 + \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right) \right. \\ & - \left. \left[|r_{Nref}|^2 \right. \right. \\ & \cdot \arcsen \left(\frac{\left(\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right)}{|r_1|} \right) \right. \\ & - \left. \left[\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right. \right. \\ & \cdot \left. \left(|r_{Nref}| - \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right. \end{aligned}$$

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{\frac{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2|r_2|+1,3-1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2|+1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2|+1,3-1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2|+1,3)} \right)^2}}{|r_{Nref}|}} \right), r_{Nref} < r_{\hat{A}qv}$$

y en donde el diámetro equivalente $D_{\hat{A}qv}$ resulta de la relación $D_{\hat{A}qv} = 2 r_{\hat{A}qv}$, en donde la superficie interior del tubo es cilíndrica y las ranuras se introducen en esta superficie interior cilíndrica, de modo que partes de la superficie interior, que forman partes de un cilindro, quedan entre las ranuras.

- 5 3. Tubo según una de las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado porque el diámetro D_i de la superficie interior en la que se han introducido las ranuras (2) está comprendido entre 15 mm y 280 mm.
4. Tubo según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque la profundidad de la ranura TT está comprendida entre 0,1 mm y 10 mm.
- 10 5. Tubo según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque el número N_T de ranuras (2) da como resultado una densidad de ranuras que está comprendida entre 1% y 347%.
6. Tubo según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque las ranuras (2) pasan en un ángulo de 20° a 40°, preferentemente de 22,5° a 32,5°, con respecto al eje longitudinal (A).
7. Tubo según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado porque el tubo es un tubo fundido centrífugamente o ha sido fabricado a partir de un tubo fundido centrífugamente introduciendo ranuras en un tubo fundido centrífugamente.
- 15 8. Tubo según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque el tubo es una aleación de níquel-cromo-hierro con alta resistencia a la oxidación y a la carburación, resistencia a la rotura por fluencia y resistencia a la fluencia de
 - 0,05% a 0,6% de carbono
 - 20% a 50% de cromo
 - 5% a 40% de hierro
 - 20 2% a 6% de aluminio
 - hasta el 2% de silicio
 - hasta el 2% de manganeso
 - hasta el 1,5% de niobio
 - hasta el 1,5% de tántalo
 - 25 hasta el 6,0% de wolframio
 - hasta el 1,0% de titanio
 - hasta el 1,0% de circonio
 - hasta el 0,5% de itrio
 - hasta el 0,5% de cerio
 - 30 hasta el 0,5% de molibdeno
 - hasta el 0,1% de nitrógeno
 y el resto es níquel, incluidas las impurezas resultantes de la fusión, constituido en particular por una aleación de este tipo.
9. Aparato para el craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en el que la mezcla de alimentación pasa a través de tubos calentados externamente, caracterizado por un tubo según una de las reivindicaciones 1 a 8.
10. Utilización de un tubo según una de las reivindicaciones 1 a 8 para el craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor, en el que la mezcla de alimentación pasa a través de tubos calentados externamente.

Fig. 1



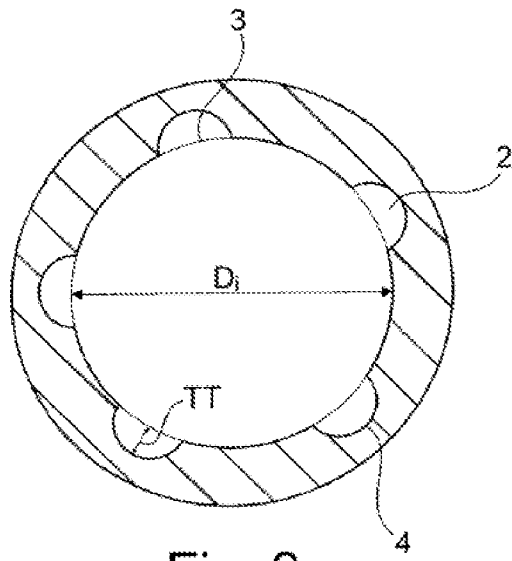


Fig. 2

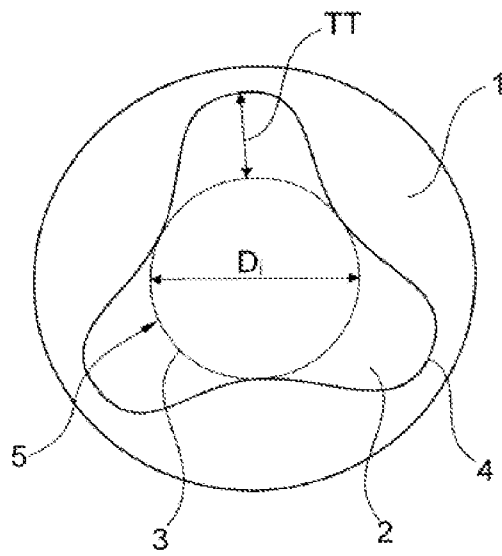


Fig. 3

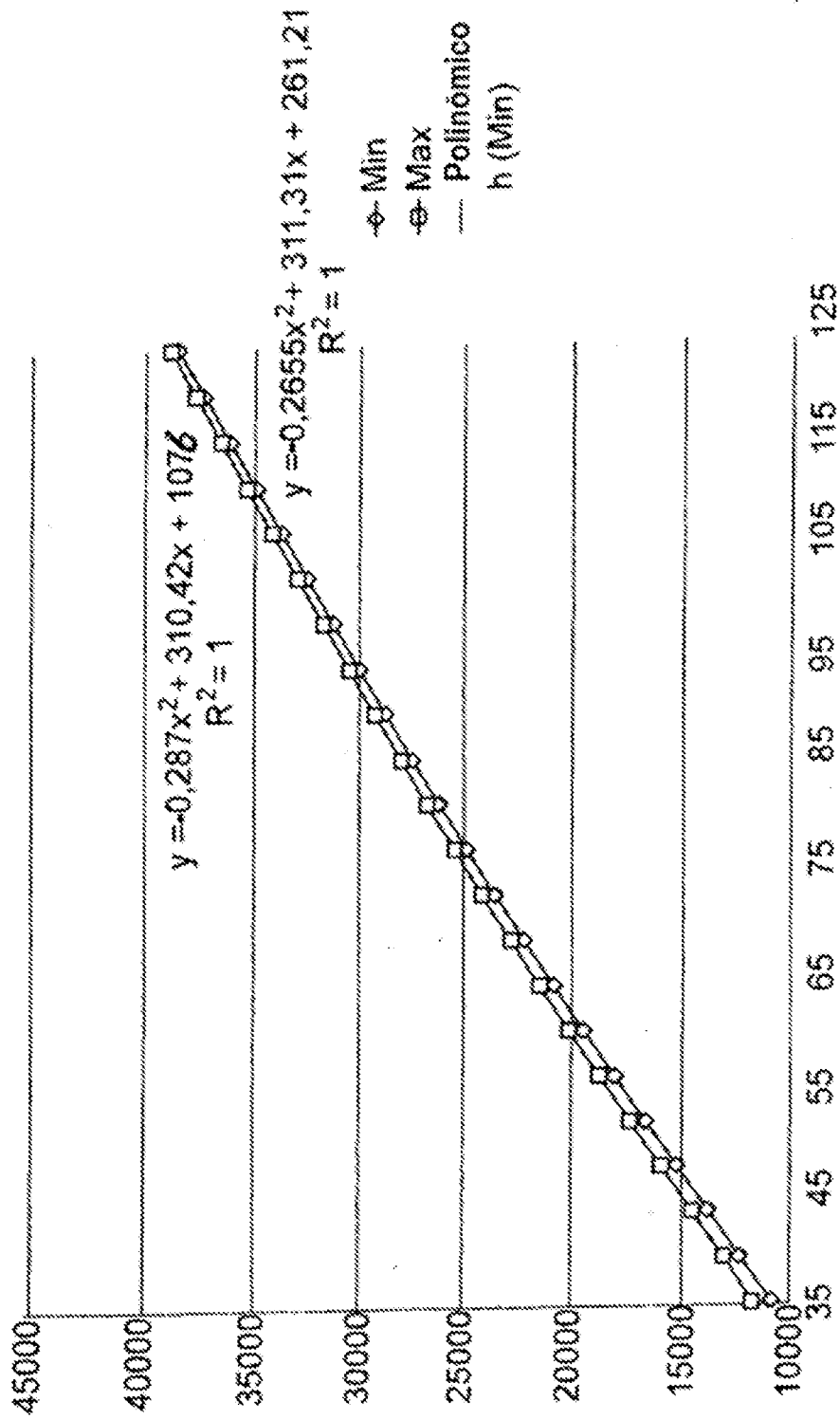
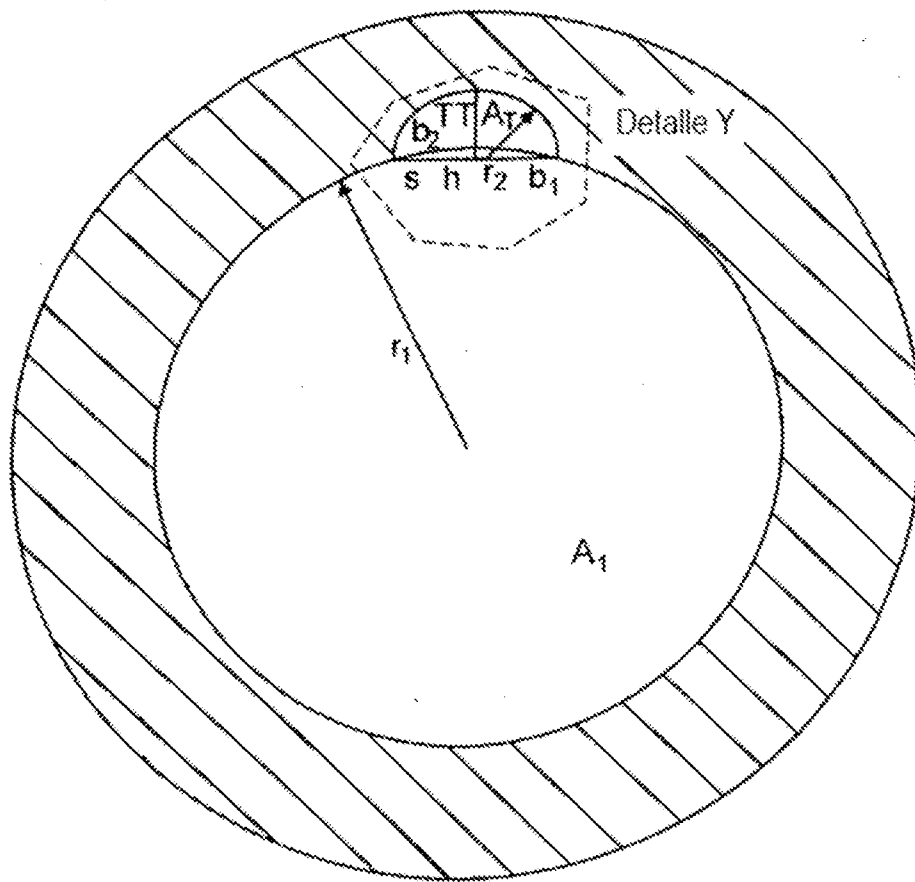


Fig. 4



Detalle Y'

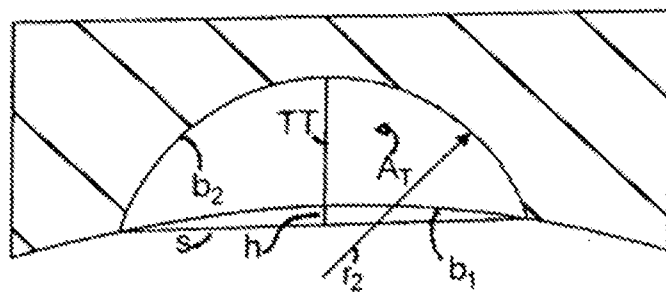


Fig. 5