

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 450 918**

51 Int. Cl.:

**F22B 29/06** (2006.01)

**F22B 35/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.07.2010 E 10735273 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.12.2013 EP 2459931**

54 Título: **Generador de vapor y método de funcionamiento para el generador de vapor**

30 Prioridad:

**28.07.2009 IT MI20091336**

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

**25.03.2014**

73 Titular/es:

**ITEA S.P.A. (100.0%)  
Via Santa Margherita al Colle 18  
40136 Bologna , IT**

72 Inventor/es:

**MALAVASI, MASSIMO;  
VOLPI GHIRARDINI, GUIDO;  
CITTI, CLAUDIO y  
SAPONARO, ALESSANDRO**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 450 918 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**

Generador de vapor y método de funcionamiento para el generador de vapor

5 La presente invención se refiere a un generador de vapor y a un método para hacer funcionar el generador de vapor. Los generadores de vapor de la presente invención pueden expandir sustancialmente la flexibilidad hacia cargas bajas (<30%), hasta el límite de una condición en espera nocturna (carga al menos inferior al 10%, preferiblemente superior o igual al 5%) en condición de control de perfil de temperatura constante y lista para aumentar rápidamente hasta la carga máxima según las demandas, incluso con combustibles, tales como carbón, que históricamente se han confinado a usos de producción continua (no flexible).

10 En la técnica se conoce que la producción de energía térmica-eléctrica está tecnológicamente muy diversificada a lo largo de los diversos tipos de combustibles y los diferentes ciclos termodinámicos usados.

15 Sin embargo, todas las soluciones tecnológicas, tanto las ya conocidas como las que todavía están en la fase de desarrollo, tienen una característica conceptualmente común, aunque sean estructuralmente diferentes en cuanto a los equipos, representada por las operaciones de recuperación térmica, en forma de calor, a partir de gases/humos de combustión no adecuados como tales para proporcionar un trabajo mecánico, con respecto al fluido de funcionamiento de un ciclo cerrado que, aprovechando la fuente de calor, puede producir trabajo mecánico. Generalmente el fluido más difundido es agua/vapor, que hace funcionar un ciclo de Rankine (característica siempre presente en la actualidad) en el que se realiza la expansión isoentrópica del vapor en una turbina. Los equipos de recuperación térmica se denominan generadores (SG).

20 La evolución de los generadores de vapor de recuperación de calor tuvo lugar según algunos criterios de orientación.

El continuo aumento del coste de los combustibles fósiles y la necesidad de reducir drásticamente la cantidad de emisiones perjudiciales, que comprenden recientemente los gases “de efecto invernadero”, por unidad de energía producida, han empujado de hecho hacia rendimientos cada vez mayores de la transformación de energía térmica-energía eléctrica, incluso aceptando el inconveniente de centrales y tecnologías más complejas y caras.

25 Tal como se sabe, rendimientos de ciclo superiores están asociados con ciclos de agua/vapor que funcionan a presiones superiores y en particular a temperaturas superiores. Suponiendo como referencia los valores críticos de vapor de presión y temperatura, es decir 22,1 MPa (221 bares) y 647 K (374°C), se ha experimentando industrialmente el pasar de ciclos subcríticos a ciclos supercríticos (SC) hasta los recientes ciclos ultrasupercríticos (USC). Por tanto con el fin de maximizar los rendimientos, actualmente se usan ciclos USC que funcionan a presiones de 240-280 bares y a temperaturas de 600-620°C del vapor sobrecalentado, en los que la recuperación térmica tiene lugar calentando el fluido de agua sin pasar por el estado de transición bifásico típico, con la presencia tanto de agua líquida como de vapor a la vez. El agua líquida pasa por el calentamiento de una manera continua desde la fase líquida hasta la fase de vapor, sin una etapa intermedia a través de las dos fases líquido-vapor típica de los generadores de vapor que funcionan en condiciones subcríticas. En los ciclos USC se pasa desde una fase de alta densidad (de tipo agua) hasta una fase de baja densidad (de tipo vapor) sin la presencia de una fase en la que estén simultáneamente presentes agua líquida y agua en vapor.

35 La notable complejidad de la manipulación del lado de agua/vapor de intercambio de calor ha representado el punto clave en las elecciones tecnológicas para los generadores de vapor subcríticos. De hecho, es importante observar que en el generador de vapor:

40 - el lado de humo, extrae calor de un gas a presión atmosférica y en condiciones próximas a la casi-linealidad del calor que va a extraerse (calor sensible) frente a la temperatura, debido a la casi-linealidad de las características térmicas (calor específico) y de las características de transporte (viscosidad, calor específico, conductividad térmica) como función de la temperatura, facilitando por tanto la ingeniería de las soluciones;

45 - el lado de agua-vapor, transfiere calor a un sistema bastante complejo, con variaciones sustanciales de las características térmicas y de transporte, del estado físico y de la entalpía de vaporización relevante y, en condiciones subcríticas, de fases mixtas a lo largo de la transición de estado con una razón fuertemente variable entre las fases líquida y de vapor.

50 Por tanto, el intercambio de calor tiene lugar con gradientes de temperatura muy diferentes entre humos y líquido/vapor de agua, bajo en la zona de precalentamiento de líquido de agua, alto en la zona de evaporación y sobrecalentamiento de vapor, con problemas de “contracción” (deltaT de humos-agua/vapor que está limitada a valores próximos a cero del intercambio de calor en el límite entre la zona de precalentamiento y la zona de evaporación).

55 Por tanto, un sistema muy complejo como para diseñar y hacer funcionar según la eficiencia y la manipulación, que se representa por tres zonas bien diferenciadas, aunque físicamente incorporadas en un único cuerpo de equipo: precalentamiento de líquido (ECO), evaporación (fase mixta de líquido y de vapor, EVA), sobrecalentamiento de vapor (SH), estando cada zona optimizada según criterios específicos y controlada según criterios específicos. Cada

una de estas zonas está por tanto equipada con instrumentos diferentes e independientes, unidades de control y circuitos auxiliares, es decir el generador de vapor está conceptual y realmente separado en tres operaciones / equipos diferentes.

5 En particular, las soluciones establecidas fijan la fase de evaporación (EVA) confinada por separadores de fases y grandes colectores de vapor para la separación definida del agua del vapor saturado producido, y estabilizada mediante condiciones de dinámica de fluido e intercambio de calor con poca variación de la fase mixta, es decir en las que se forman cantidades limitadas de vapor en grandes masas de agua recirculada.

10 Esta solución ha sido la más preferida, se ha consolidado por su gran uso y por las características apreciables de gran estabilidad en el control, se ha visto favorecida por la inercia dada por las grandes masas de agua contenidas en colectores de vapor (grandes recipientes a alta temperatura y presión) y se ha apreciado para las grandes centrales termoelectricas, que han sido históricamente parte de la estructura principal que suministra la reserva continua (es decir, el mínimo nocturno del consumo de EP) de energía a las redes de distribución.

15 La evolución de los generadores de vapor de subcríticos a SC, hacia los USC, desde un lado, ha privado parcialmente de sentido la distinción en tres zonas diferenciadas separadas y de los grandes sistemas separadores de agua/vapor. Sin embargo todavía debe mantenerse el criterio de la distinción en tres zonas (ECO, EVA, SH), ya que la parcialización de la carga de energía tiene lugar, en las máquinas de conversión de energía térmica-eléctrica (turbinas), a través del concepto de presión deslizante (reducción de la presión de vapor). De hecho, los generadores de vapor USC, cuando la presión de generación de vapor disminuye por debajo de la presión crítica, vuelven a las condiciones subcríticas (aparición de agua y vapor en dos fases, a lo largo de la curva de calentamiento). En otras palabras, la producción de energía puede modularse de una manera continua (control de perfil de temperatura casi constante) desde el valor nominal hasta el límite de aproximadamente el 30% con respecto a la energía nominal a constante. En vez de eso, por debajo de una carga del 30%, dependiendo de las diversas soluciones adoptadas, se usan sistemas de inicio dedicados.

25 Por último, la generación de energía tenía que tener en cuenta las tendencias durante todo el día del los consumos de energía. La evolución de la demanda del sistema de consumidores e industrial ha provocado un aumento sensible del consumo de energía durante las horas diurnas, con una razón entre la demanda de energía en horas diurnas/horas nocturnas muy superior a 3, y con picos anómalos de demanda con respecto al consumo de base continuo (horas nocturnas). Esto se conoce como "ciclos" (diarios).

30 En el lado de producción, la generación de energía continua a plena carga ha sido históricamente una prerrogativa de las centrales grandes con bajos costes variables, es decir las nucleares, y de las centrales térmicas, principalmente las activadas por carbón, dejando la absorción de la demanda diurna y los picos (ciclos) a tecnologías intrínsecamente de rápida respuesta para el arranque y para el aumento/disminución de carga de energía con respecto a la carga nominal, tales como las tecnologías basadas en ciclos de turbina de gas. Este esquema ha podido absorber los ciclos, al menos hasta no hace mucho.

35 Sin embargo debe destacarse que los otros factores en desarrollo crean un desequilibrio:

- se espera que la tendencia divergente de los consumos de energía diurno y nocturno aumente adicionalmente, reduciendo el consumo de base continuo (horas nocturnas),

- el aumento de la energía nuclear, que insistirá en el mismo consumo de base continuo, ganará terreno a las tecnologías de energía térmica que usan combustibles fósiles (carbón),

40 - la necesidad de rendimiento superior también ha tenido un impacto sobre las tecnologías intrínsecamente rápidas anteriormente mencionadas, provocando la evolución desde la turbina de gas simple hasta la turbina de gas de ciclo combinado (adición de un generador de vapor para la recuperación de calor a partir de humos calientes descargados por la turbina de expansión) y en el futuro al ciclo combinado con generador de vapor de alto rendimiento de recuperación de tipo USC.

45 Los requisitos de ciclos excluyen para los ciclos combinados los generadores de vapor de "colector de vapor" convencionales, demasiado lentos en cuanto a la variación de carga, y han proporcionado nuevas soluciones, de las cuales ya hay evidencias al menos para las denominadas centrales de respuesta rápida.

50 Todos estos factores de evolución empujaron notablemente hacia nuevas soluciones, posiblemente concebidas en combinación con las nuevas tecnologías para desarrollarse con un objetivo de emisión casi nulo a partir de combustibles fósiles. Tal como se mencionó anteriormente, una nueva solución ya evidente en la actualidad se refiere a generadores de vapor con recuperación de calor de ciclos combinados (rápidos).

Los ciclos diarios y la respuesta rápida frente a variaciones de carga han requerido descartar el uso de colector de vapor, es decir del esquema de tres fases, y el cambio a un esquema mucho más flexible conocido como "de un solo paso", literalmente lado de agua/vapor de un único paso.

55 Por ejemplo, se ha establecido el esquema de contracorriente pura, es decir fluidos que pasan a través del equipo

en direcciones opuestas, y con contacto/intercambio, a través de una pared, entre humos calientes y vapor caliente en un lado, hasta humos fríos en contacto con agua fría que va a precalentarse, es decir a una  $\Delta T$  de intercambio de calor minimizada. El equipo es vertical: los humos se elevan desde el fondo cruzando bancos de tubos de agua/vapor horizontal y el agua discurre hacia abajo desde la parte superior en “un solo paso”.

5 La flexibilidad se obtiene mediante:

- arranque del generador de vapor con tubos secos (sin agua) para eliminar la inercia térmica adicional del calor sensible al agua que va a suministrarse,

- ausencia de agua acumulada (colector de vapor, separadores de agua/vapor) para minimizar la inercia de regulación con las variaciones de carga (variación de carga en presión deslizante),

10 - fluidos pesados (alta densidad relativa) (agua y fases mixtas de agua/vapor en condiciones subcríticas; y agua, a temperaturas inferiores a la temperatura crítica, en condiciones supercríticas) que discurren hacia abajo, literalmente caen, hacia las zonas de fluido de baja densidad (vapor, agua de baja densidad a temperaturas superiores a la temperatura crítica ( $T_{cr}$ )).

15 De esta manera se superan los problemas de flujo intermitente (flujo tapón). De hecho, estos problemas surgirán en el caso de flujo de agua/vapor ascendente, para esquemas con tubo simple que pasa de manera ininterrumpida a través de todo el generador de vapor, para todas las razones de agua/vapor altas a lo largo de la zona de evaporación.

20 Un ejemplo de esquema de contracorriente pura, aplicado a condiciones subcríticas, es el IST del grupo AECON. Específicamente resuelve, a un flujo con razón de agua/vapor alta e intermitente, los problemas de la segregación de vapor en burbujas a partir de un flujo de agua todavía a baja velocidad, y posteriormente, a razones inferiores, de agua estratificada y flujo ondulado con sobrecalentamiento del techo del tubo, seguido por la proyección de agua sobre el techo del tubo (flujo intermitente, flujo tapón) y posterior descascarillado de la pared metálica.

25 Sin embargo con la variación de carga, y especialmente a cargas bajas, en particular inferiores a aproximadamente el 30%, no se superan los problemas debidos a perfiles de temperatura a lo largo de la trayectoria de agua muy diferentes de los de carga máxima, y en particular no se supera la extensión a la mayor parte de la longitud del tubo de temperaturas próximas a la temperatura de los humos calientes entrantes. Se desprende que para la mayor parte de la superficie de intercambio los tubos deben fabricarse de materiales de alta aleación (aleaciones con un alto contenido en níquel y otros metales valiosos), con los consiguientes costes superiores. El uso de materiales de alta aleación en las superficies de intercambio se vuelve evidente en el caso de un equipo de este tipo insertado aguas abajo de un reactor de combustión de carbón de la técnica anterior.

30 Además, el esquema de “un solo paso” con agua “que discurre hacia abajo” requiere una instalación vertical de la central. Esto es un límite de relevancia en cuanto a inversión de capital particularmente para las unidades de energía grandes. Finalmente, merece la pena indicar, aparte de la extensión de alta temperatura a las tuberías anteriormente mencionada, que con el fin de subir o bajar rápidamente la carga es necesario que las operaciones puedan llevarse a cabo con un control de perfil de temperatura constante (para generadores de vapor esto significa mantener los perfiles de temperatura de humos y agua/vapor en la misma alineación y posición geométrica en el generador de vapor, condición conocida en la técnica anterior como condición de control de perfil de temperatura constante, o “control de perfil”), lo cual no es el caso para la caldera IST, a lo largo de un amplio intervalo de carga.

35 Por tanto la indudable flexibilidad de esta realización, que es la rápida variación de carga hacia arriba y hacia abajo con un control de perfil de temperatura constante, se atenúa hasta desaparecer a cargas inferiores al 30%. De hecho, la gestión/control de porciones notables del generador de vapor, a diversas razones de vapor/agua y a un caudal de vapor bajo, debido a la carga baja, ya no se soporta únicamente por el flujo descendente de agua y requiere estrategias de control progresivamente diferentes y por tanto que no pueden hacerse funcionar en tiempo real.

40 La preocupación de que el flujo descendente de agua por gravedad puede provocar riesgos inaceptables de daño de turbina, en condición transitoria (arranque/parada) y en condiciones de carga baja (<30%), mediante una desviación inaceptable a partir del estado estacionario (razón de agua/vapor) del flujo de agua/vapor, y mantener no obstante, para una parte sustancial del generador de vapor,  $\Delta T$  bajas (por los motivos anteriormente mencionados), resulta evidente en la invención USP 5.159.897. En esta patente el esquema de “un solo paso”, con humos calientes desde la parte inferior y agua desde la parte superior, se combina con una zona intermedia en la que el fluido de agua/vapor bifásico (agua en evaporación) vuelve a ascender (contra la gravedad) en flujo co-corriente con los humos, delimitando una zona en la que está contenida preferiblemente el agua que va a evaporarse, la cual a cargas bajas se moverá hacia la salida en condiciones no estacionarias. Además, al ser la transición de fases agua/vapor (en condiciones subcríticas) un fenómeno isotérmico, la ineficacia entrópica del intercambio de calor co-corriente resulta despreciable. Sin embargo en condiciones de plena carga USC las ineficacias entrópicas se vuelven relevantes y la flexibilidad a cargas bajas sólo puede obtenerse extendiendo de todos modos la porción de superficie de intercambio fabricada de materiales de alta aleación.

- 5 La preocupación de la deltaT alta (materiales, desprendimiento) y del choque térmico durante las rápidas variaciones de carga, resulta evidente en el documento USP 7.383.791 en el que el esquema de “un solo paso” (un tubo individual ininterrumpido desde la entrada hasta la salida) diseña la trayectoria de agua de modo que el flujo ascendente de humos calientes entra en contacto en primer lugar con agua que va a precalentarse, con el fin de limitar la deltaT en la zona de generación de vapor SH (máximo de la temperatura de fluido que va a calentarse) y los riesgos de choque térmico en la zona de evaporación. Por tanto, el agua entra desde la parte inferior y se precalienta con los humos calientes, sale y vuelve a entrar en la parte superior en flujo descendente, contracorriente con los humos ascendentes para la fase de evaporación de agua/vapor y la fase de sobrecalentamiento.
- 10 Sin duda, la deltaT de humos-agua/vapor está más limitada con respecto a los casos anteriores (IST) y pueden usarse materiales menos valiosos para una porción más grande de la superficie de intercambio de calor. Sin embargo resulta evidente que esto es a costa del rendimiento global del ciclo, dada la formación de entropía asociada con el intercambio de calor humo caliente-agua en la etapa de precalentamiento.
- El documento US 4331105 muestra un generador de vapor de un solo paso adicional.
- 15 Aunque los casos anteriormente descritos introducen, en el funcionamiento, mejoras de flexibilidad (tasa de variación de carga) con perjuicio para la eficacia o a costa de un uso mayor de materiales de alta aleación caros, para estos y para las demás soluciones consolidadas todavía queda el problema de que para cargas inferiores al 30% el generador de vapor se aleja significativamente del perfil térmico óptimo (temperaturas de banco de tubos, perfil de temperatura de agua/vapor y humos) de plena carga (desviación del control de perfil de temperatura óptimo establecido para carga alta). De ello se desprende que, para el arranque y para el funcionamiento a una carga de hasta el 30%, es necesario salir de la condición de control de carga alta y llevar a cabo una serie de operaciones con diversas lógicas y con el uso de circuitos/hardware auxiliares. Esto implica una penalización tangible en cuanto a la velocidad de arranque y para la carga que sube hasta el 30%, y de la complejidad de la condición de control. Para tipos de centrales de energía, tales como de turbina de gas de ciclo combinado, que se distinguen por un inicio rápido y un rendimiento de aumento de carga rápido, la penalización tiene un impacto económico significativo.
- 20 Específicamente, el generador de vapor de los ciclos combinados es el elemento que determina la velocidad de inicio y de aumento de carga, que impone retrasos del orden de decenas de minutos, hasta de más de una hora.
- 25 Se han estudiado diversos esquemas con el fin de intentar limitar el impacto negativo de esto. Uno propone desconectar el generador de vapor de la turbina de gas, creando una derivación de humos calientes enviados directamente a la chimenea sin pasar a través del generador de vapor. Otro esquema propone modular (mediante reducción) la potencia de la turbina de gas, mediante el número de revoluciones y el combustible, enviando todos los humos al generador de vapor, con modulación (caudal de humos y temperatura de humos) basándose en el procedimiento de arranque y en el rendimiento de aumento de carga del generador de vapor.
- 30 El alejamiento de la condición de control de perfil de temperatura también tiene necesariamente lugar porque el flujo de intercambio de calor a alta temperatura no se basa en un único mecanismo bien conocido (convección forzada), sino en dos:
- 35 - el intercambio por convección forzada, que aumenta-disminuye de manera constante (de una manera casi lineal) con la carga, es decir con los caudales de humo y con la temperatura de humo (deltaT),
- el intercambio por irradiación procedente de los humos que sólo depende de la temperatura (T) a la 4ª potencia, es decir (T<sup>4</sup>),
- 40 en los que el segundo mecanismo no es despreciable a alta temperatura.
- Dependiendo de la central que genera humos aguas arriba (combustión, generador de humo caliente) se tendrá:
- 45 - para una turbina de gas aguas arriba, en la que la flexibilidad a cargas bajas no es significativa y en vez de eso el velocidad de inicio y la velocidad de aumento de carga son predominantes, que en el caso ideal funciona a un caudal de humos constante y ajusta la carga modulando la temperatura, la variación de carga en descenso (aumento) implica una desviación significativa del intercambio de flujo de calor de la linealidad con la carga ya que no puede evitar/minimizar el impacto del segundo mecanismo (intercambio por irradiación),
- para una cámara radiante de combustión de petróleo o carbón aguas arriba, lo que sólo modula la carga con el caudal a una temperatura constante, la contribución al flujo de calor por irradiación a partir de los humos es invariable y no se permite un flujo de calor inferior al radiante.
- 50 Por tanto, en los funcionamientos a una carga inferior al 30%, el control de perfil de temperatura no puede mantenerse y deben emprenderse progresivamente diferentes lógicas de control, más diferentes cuanto más disminuye la carga, y con frecuencia con el uso de circuitos auxiliares (recirculaciones externas, inyección-modulación de agua a vapor) que interrumpen la trayectoria de tubo individual. Es decir, no puede hacerse funcionar el generador de vapor extendiendo el control de perfil de temperatura automático a todo el intervalo de carga inferior
- 55 al 30% (tanto en aumento como en descenso) así como en las fases de inicio/parada.

Por tanto, existía la necesidad de disponer de generadores de vapor que tengan la siguiente combinación de propiedades

- dotados de una alta flexibilidad y, además, fabricados de materiales comparables a los usados en los generadores de vapor establecidos,

5 - que puedan expandir sustancialmente la flexibilidad hacia cargas bajas (<30%), hasta el límite de una condición en espera nocturna (carga al menos inferior al 10%, preferiblemente superior o igual al 5%) funcionando con un control de perfil de temperatura constante,

10 - listos para volver a aumentar rápidamente hasta una carga máxima según las demandas, incluso con combustibles, tales como carbón, que históricamente se han confinado a usos de producción con carga alta estacionaria.

De hecho, debe recordarse que, para las características de la turbinas, el rendimiento específico para producir energía por unidad de combustible (kWh producidos/KJulio de calor de combustión) disminuye significativamente a medida que disminuye la carga, hasta valores inaceptables (aproximadamente del 15%) a cargas de central del 30%, es decir al límite de carga inferior adecuado para el control de perfil de temperatura.

15 El solicitante ha encontrado de manera sorprendente e inesperada un generador de vapor que soluciona el problema técnico anteriormente descrito y que puede satisfacer los requisitos de alta eficacia y de ciclos, y con costes reducidos (materiales convencionales de la técnica anterior).

Un objeto de la presente invención es proporcionar un generador de vapor que comprende

20 - tubos de agua/vapor que pasan a través del generador de vapor desde la entrada de agua hasta la salida de vapor sobrecalentado, en el que

- los tubos de agua/vapor están dispuestos horizontalmente en bancos de tubos, preferiblemente bancos de tubos planos, atravesados perpendicularmente por los humos,

25 - los tubos ascienden a lo largo del eje del generador de vapor desde un banco de tubos hasta el otro, con una trayectoria oblicua, para exponerse al flujo de humo en una posición diferente en cada banco de tubos (véase la figura 1),

- los tubos están divididos en dos o más ramificaciones separadas, alimentándose cada ramificación por un cabezal distinto de los otros (véase la figura 5),

30 - siendo el generador de vapor de un solo paso en flujo en contracorriente pura, vertical con la entrada de humo desde la parte superior y la entrada de agua desde la parte inferior, u horizontal, pero siempre en flujo en contracorriente,

- los cabezales del vapor sobrecalentado de salida están agrupados con contacto directo en un haz y el haz está térmicamente aislado del exterior,

- opcionalmente, los inicios de cabezal están ubicados en el flujo de humo, en una posición tal que los humos están a una temperatura próxima a la temperatura de vapor sobrecalentado (véase la figura 6),

35 - opcionalmente, modulación de temperatura de los humos calientes de entrada recirculando los humos fríos tras la recuperación de calor,

- opcionalmente, están presentes una o más secciones de recalentamiento que derivan de vertido a presión intermedia de la turbina,

- opcionalmente pueden estar presentes uno o más niveles de presión de vapor para el recalentamiento.

40 Los tubos de agua/vapor pasan preferiblemente a través del generador de vapor desde la introducción de agua hasta la salida de vapor sobrecalentado preferiblemente sin entradas y salidas intermedias, más preferiblemente sin interrupción. Los tubos de agua-vapor pueden fabricarse de materiales normalmente usados en generadores de vapor USC convencionales.

45 Generalmente los materiales usados varían dependiendo de la temperatura de funcionamiento a la que se someten a lo largo del eje del generador de vapor. En el generador de vapor de la invención la sección de material de alta aleación sólo es la correspondiente a la última parte en la que se realiza el sobrecalentamiento de vapor final. Por ejemplo, si el vapor sale a 605°C y a una presión de 240-280 bares, la longitud de esta parte corresponde a aproximadamente el 10% de la longitud del tubo. Tras la primera parte de material de alta aleación, hay en secuencia una cascada de materiales que comprenden preferiblemente aceros al cromo, fabricándose la mayor parte de la longitud del tubo (aproximadamente el 60%) preferiblemente de acero al carbono.

50

Los tubos de agua/vapor dispuestos en bancos planos, atravesados perpendicularmente por humos, tienen preferiblemente una longitud de tubo horizontal rectilínea relativamente limitada, de manera general preferiblemente inferior a 12 metros, todavía más preferiblemente inferior a 6 metros.

5 Estas dimensiones se usan para evitar secciones horizontales rectilíneas demasiado largas, que favorecen la aparición de acumulación de agua periódica y propagación de flujo tapón (o flujo intermitente). Por tanto, aunque la carga de funcionamiento mínima del tubo es de aproximadamente el 30%, en los generadores de vapor de la invención se prefieren longitudes más cortas, tal como se menciona, seguidas por nuevo mezclado (curvas, ascensos más frecuentes) con el fin de evitar el fenómeno de flujo tapón y su propagación. Cuando se usan tubos estriados, véase a continuación, la longitud de tubo puede ser incluso más larga, por ejemplo de 20 metros.

10 A continuación se describen en detalle los tubos que ascienden con una trayectoria oblicua entre un banco de tubos y el otro.

Los tubos de agua/vapor están divididos en dos o más ramificaciones separadas, alimentadas por separado, tal como se describe en detalle a continuación en el presente documento.

Los cabezales están colocados preferiblemente según criterios descritos en detalle a continuación.

15 El generador de vapor de la invención es de un solo paso vertical en contracorriente pura, preferiblemente con entrada de humo desde la parte superior y entrada de agua desde la parte inferior.

Preferiblemente, el generador de vapor de "un solo paso" en contracorriente pura de la invención es horizontal. De esta manera se simplifica la instalación industrial y por tanto se logra una reducción sustancial de los costes de instalación. Este punto se ilustra más ampliamente a continuación.

20 La modulación de temperatura de los humos calientes de entrada se realiza preferiblemente recirculando humos fríos tras la recuperación, tal como se describe a continuación cuando se ilustran las ventajas referentes al control de vapor sobrecalentado y a la eliminación de la contracción.

25 Un objeto adicional de la invención es un procedimiento para hacer funcionar el generador de vapor de la invención en una modalidad de presión deslizante, con agua/vapor siempre en condiciones supercríticas a una carga del 100% (figura 7A) y con presión cada vez menor con la disminución de la carga (figura 7B para una carga del 50%), con el fin de obtener vapor en la salida del generador de vapor que tiene las condiciones de presión requeridas para la inyección en la turbina que funciona a la carga seleccionada como objetivo.

30 Opcionalmente el generador de vapor puede hacerse funcionar en una modalidad a presión constante, con el agua/vapor en el generador de vapor siempre en condiciones supercríticas para todas las cargas (carga de desde el 100% hasta el 30%) y estrangulamiento final antes de la inyección en una turbina (figura 7C para una carga del 50%).

Un objeto adicional de la invención es un procedimiento para hacer funcionar el generador de vapor de la invención a cargas de desde el 5-10% hasta el 100% que comprende las siguientes etapas:

35 - mantener los perfiles de temperatura de los humos y del agua/vapor en la misma alineación y la misma posición geométrica del generador de vapor,

- limitar la superficie de intercambio de calor a cargas bajas, es decir inferiores a aproximadamente 30%, excluyendo y después manteniendo en un estado seco una o más ramificaciones, hasta el límite de tener sólo una ramificación en funcionamiento.

40 Preferiblemente el mantenimiento del perfil de temperatura de los humos y del agua/vapor en la misma alineación y la misma posición geométrica a lo largo del generador de vapor se realiza mediante dos o más de los siguientes procedimientos:

a) limitar la superficie de intercambio para cargas inferiores a la carga de presión deslizante mínima (30%), excluyendo y después manteniendo en un estado seco una o más ramificaciones, hasta el límite de tener sólo una ramificación en funcionamiento,

45 b) controlar por realimentación, cambiando el control para la desviación a partir del estado estacionario, el caudal de agua de alimentación, a cualquier carga, manteniendo la posición, a lo largo del generador de vapor, del punto de inflexión de la temperatura cuando pasa a través de condiciones críticas para cargas que requieren condiciones supercríticas, y de la isoterma de vaporización para cargas que requieren condiciones subcríticas en presión deslizante,

50 c) controlar por realimentación (cambiando el control para la desviación a partir del estado estacionario) la temperatura de vapor producido a cualquier carga, ajustando la temperatura de humo caliente, mediante recirculación de humos fríos, que va a realizarse para calderas que dan servicio aguas abajo de la unidad de combustión de combustible sólido,

d) controlar por realimentación de la temperatura de humo a la salida del generador de vapor, actuando sobre el precalentamiento de agua de alimentación.

La solución preferida para el mantenimiento del perfil de temperatura es el uso de las etapas b) y c) anteriormente mencionadas.

- 5 Opcionalmente el procedimiento de la invención comprende la siguiente etapa e):
- mantener, en todas las condiciones de presión del vapor producido, la primera sección del generador de vapor en condiciones de presión supercrítica, seguido por estrangulamiento, cuando la entalpía del fluido permite, aguas abajo de la etapa de estrangulamiento, la transformación directa del fluido supercrítico en la fase de vapor sin cruzar el área de fluido de agua/vapor bifásica (figura 7C).
- 10 A continuación en el presente documento se describe en detalle la etapa de la limitación de la superficie de intercambio de calor, cuando se funciona a cargas bajas.
- A continuación se trata la etapa c) de control por realimentación de la temperatura de vapor producido a cualquier carga, modulando la temperatura de humo caliente, donde se informa sobre cómo mantener la temperatura de vapor sobrecalentado y evitar los fenómenos de contracción.
- 15 A continuación se trata en detalle la etapa b) de control por realimentación del caudal de agua de alimentación a cualquier carga manteniendo el punto de inflexión de la temperatura en condiciones supercríticas o de la isoterma de vaporización en condiciones subcríticas (en presión deslizante).
- Opcionalmente el procedimiento de la invención comprende la etapa e) de estrangulamiento opcional, que puede resultar de interés para instalaciones horizontales en caso de centrales de ciclo combinado de alta capacidad.
- 20 El generador de vapor de la invención, que se hace funcionar con el procedimiento anteriormente descrito, puede, de manera inesperada y sorprendente, ofrecer los rendimientos anteriormente mencionados sin un aumento de coste significativo. El generador de vapor de la invención cumple con los ciclos de carga de desde el 5-10% hasta el 100%, tiene una alta eficiencia y trabaja sin requerir necesariamente materiales de alta aleación para la mayor parte de la superficie (pared) de intercambio de calor.
- 25 La presente invención pone por tanto a disposición generadores de vapor que tienen una alta flexibilidad, fabricados de materiales de una calidad comparable a los de generadores de vapor convencionales, que también pueden funcionar a cargas muy bajas, del orden del 5-10%, que trabajan con funcionamiento constante y en condición de control de perfil de temperatura, y que pueden aumentar rápidamente de nuevo hasta la carga máxima, también cuando se usan combustibles sólidos tales como carbón.
- 30 El generador de vapor de la invención, con las características anteriormente mencionadas, muestra además las siguientes propiedades:
- mantenimiento estacionario del perfil de disminución de temperatura de humo a lo largo de la estructura del generador de vapor en todas las condiciones de carga, desde un mínimo de carga de aproximadamente el 5-10% hasta el 100%,
  - mantenimiento casi constante del perfil de temperatura (en otras palabras, se mueve pero no modifica su forma), a lo largo del lado de agua/vapor del generador de vapor, en todas las condiciones de carga, para la producción de vapor tanto supercrítica como subcrítica,
  - mantenimiento siempre de una buena distribución del caudal de agua en los tubos de una ramificación individual mediante orificios de flujo simples (carga mínima de la ramificación en funcionamiento igual/superior al 30%),
  - solución, con la dirección oblicua del tubo, de cualquier problema relacionado con una distribución irregular del flujo de humos (canales de flujo de humos que tienen un "historial" de intercambio diferente, entre el flujo de humos total),
  - mantenimiento de una  $\Delta T$  de agua/vapor frente a humos mínima a lo largo del SG, es decir una buena  $\Delta T$ ,
  - limitación de la superficie de intercambio de calor (1/2, 1/3, 1/4, etc.), por ejemplo excluyendo progresivamente (deteniendo la alimentación de agua y llevándola a un estado seco) una o más ramificaciones, para mantener la configuración de control de perfil de temperatura hasta la carga del 30% de una ramificación individual, es decir hasta una carga global de aproximadamente el 5% en el caso de seis ramificaciones o una carga del 10% en el caso de tres ramificaciones, siendo generalmente valores del 5% al 10% iguales a la carga en espera de la central,
  - solución del problema de contracción de  $\Delta T$ , mediante la modulación del caudal-temperatura de los humos calientes al mismo valor de carga global.
- 50 Por tanto la presente invención hace disponible:

- un perfil deltaT de intercambio de calor de humo-agua próximo al óptimo, determinado para plena carga, en todas las condiciones de carga, y por tanto a un flujo de calor siempre próximo al óptimo, tanto a lo largo del eje del generador de vapor como en cualquier plano ortogonal al eje del generador de vapor,
  - 5 - la temperatura de los tubos fuera de servicio (secos), sólo se desvía (es superior) de la temperatura de funcionamiento en servicio para la deltaT de intercambio de calor, debido al mantenimiento en todas las condiciones de carga del perfil de disminución de la temperatura de humo en la posición geométrica (a lo largo del eje del generador de vapor), establecida para las condiciones de plena carga,
  - una única lógica para el control de perfil de temperatura constante en todo el intervalo de carga de desde el 5-10% hasta el 100%, dando lugar a una única lógica de automatización en todo el intervalo de carga,
  - 10 - velocidad muy alta de aumento de carga, o de disminución de carga bajo el control por alimentación anticipada, limitada sólo por los tiempos de respuesta característicos de los instrumentos/equipos convencionales, que se hace funcionar en la lógica de control de perfil de temperatura constante.
- Con las características anteriormente mencionadas, se obtienen las siguientes prestaciones deseadas:
- arranque rápido (con tubos secos),
  - 15 - flexibilidad de carga muy amplia, en condiciones de control de perfil de temperatura, hasta el valor límite de aproximadamente el 5-10% de la carga térmica (condición en espera caliente),
  - modulación de carga rápida en el intervalo de carga de desde el 5-10% hasta el 100%,
  - materiales de los tubos que se adaptan a las normas actualmente usadas en centrales no flexibles.
- 20 El esquema de principio de la invención es sencillo, similar a un intercambiador de calor en contracorriente pura, tal como se muestra en la figura 6. En la misma se notifica, como ejemplo, la división del agua/vapor en tres ramificaciones separadas (división triple de la superficie de intercambio de calor).
- 25 El efecto de combinar la modulación de la temperatura de humo de entrada con la división múltiple en ramificaciones sobre el mantenimiento de los perfiles de temperatura a cargas bajas y sobre el uso de materiales convencionales, resulta evidente comparando (misma condición límite para ambos) el perfil de temperatura del agua/vapor y de los humos a lo largo del eje del generador de vapor, en el caso sin división (figura 9) y con el procedimiento de la invención en el que hay división triple y exclusión de dos de las tres ramificaciones (figura 10).
- 30 El desarrollo de cada tubo de intercambio de calor individual preferiblemente sin interrupciones desde la entrada de agua hasta la salida de vapor sobrecalentado, y la división en más ramificaciones, permite la distribución perfecta del caudal en cada tubo individual mediante orificios simples (pérdidas de cabeza localizadas), sin penalizaciones de energía para pérdidas de carga excesivas a plena capacidad o distribuciones irregulares debido a pérdida de cabeza insuficiente a cargas bajas (5-10%), siendo la carga mínima de la ramificación en funcionamiento de 30% para lograr la carga total deseada del 5-10%.
- 35 Tal como se menciona, el agua/vapor se divide en ramificaciones, al menos 2 ramificaciones, preferiblemente 3 ramificaciones, todavía más preferiblemente desde 4 hasta 6 ramificaciones. Con el fin de mantener el perfil de temperatura deseado (lado de humo y lado de agua/vapor) cuando se ponen una o más fuera de servicio, se toma un tubo del cabezal de cada ramificación para formar pares, tríos, conjuntos de cuatro grupos (etcétera), de modo que los tubos de ramificación siempre están agrupados de manera contigua. Véase la figura 5 para el caso de tres ramificaciones.
- 40 Siempre para obtener los resultados anteriormente indicados, el tubo, tras haber pasado a través de un banco de tubos horizontal, sube oblicuamente hacia el siguiente banco de tubos para evitar formar trayectorias de humo y agua/vapor desequilibradas y para mejorar la distribución irregular de los humos, siempre presente en cualquier configuración de geometría y el diseño del generador de vapor (véanse las figuras 1, 2, 3 y 4). La subida oblicua para ocupar la posición del tubo contiguo en el siguiente banco de tubos implica que el tubo que ha alcanzado el extremo (la posición más externa) del banco de tubos, vuelve al otro extremo del banco de tubos cruzando toda la
- 45 parte frontal del banco de tubos (figuras 1 a 4, en particular la figura 2).
- Tal como se menciona, la limitación de superficie permite mantener constante el perfil de disminución de temperatura de humos, gracias al hecho de que se excluyen una o más ramificaciones del funcionamiento, por ejemplo excluyendo la alimentación de agua y/o cerrando la salida hacia el vapor sobrecalentado a alta presión.
- 50 Manteniendo en su sitio el perfil de temperatura de humos, se obtiene además que se lleva la ramificación fuera de servicio como máximo hasta la temperatura de humos con respecto a la posición axial, a lo largo del eje del generador de vapor. Además, gracias al ajuste de la temperatura de humos calientes, mediante mezcla de humos fríos recirculados, y el control de temperatura de vapor sobrecalentado vinculado a la temperatura de entrada, la deltaT (entre humos y agua/vapor) del perfil obtenido siempre es muy pequeña, incluyendo la zona caliente. Por tanto se excluye el sobrecalentamiento excesivo de tubos fuera de servicio, con respecto a la condición de

funcionamiento diseñada; por tanto, no se necesita mejorar los materiales, en comparación con la secuencia tradicionalmente establecida de materiales usados en calderas USC.

5 En la figura 8 se notifican temperaturas nominales de humos, agua/vapor y mecánicas para los diversos materiales usados (en cascada a lo largo del eje del generador de vapor) tanto para un generador de vapor convencional como para el generador de vapor de la invención, a una carga del 100%. En la figura 9 se notifican las mismas características de la figura 8 para una carga baja (<30%) en un generador de vapor convencional, que no tiene limitación de superficie en ramificaciones distintas. A partir de la figura 9 resulta evidente que el perfil de temperatura de los tubos supera las temperaturas previstas a carga baja y se requiere una mejora de materiales.

10 Por el contrario el perfil de temperatura de humos, obtenido funcionando con una ramificación (de las tres en el ejemplo propuesto, figura 10), permite que las ramificaciones que no están en funcionamiento nunca superen, en cada punto del generador de vapor, las temperaturas nominales normalmente impuestas para el USC en funcionamiento.

15 En el generador de vapor de la invención, el mantenimiento/control de perfil de temperatura del lado agua/vapor, desde las condiciones USC a carga máxima hasta una carga inferior mediante disminución de la presión hasta condiciones subcríticas (presión deslizando) hasta un límite del 30% en una ramificación o en más ramificaciones, se realiza manteniendo la posición geométrica, a lo largo del eje del generador de vapor, del punto de inflexión de la temperatura en condiciones supercríticas o de la temperatura de vaporización isotérmica en condiciones subcríticas. La posición se detecta mediante mediciones de la temperatura del flujo de agua/vapor. Se detecta la posición de inflexión o la posición de vaporización isotérmica, y precisamente aguas arriba y aguas abajo de la meseta en la que tiene lugar el cambio de temperatura positiva y negativa de la inflexión o de la vaporización isotérmica. De hecho, se ha observado que las condiciones supercríticas, aunque la vaporización isotérmica bifásica está ausente, muestran de manera correspondiente un punto de inflexión de la temperatura marcado (casi isotérmico) y con una variación pronunciada de la densidad y la entalpía. Más precisamente, hay una continuidad de la "forma" del perfil de temperatura de subcrítico a supercrítico, y para los parámetros anteriormente mencionados. Por tanto, con una única lógica, la regulación por realimentación, actuando sobre el caudal de agua de entrada, mantiene la posición de la porción isotérmica, o casi isotérmica, en su sitio y por consiguiente el perfil de temperatura deseado, es decir mantiene las características y topología del intercambio de calor.

20 En el caso de la instalación del generador de vapor de la invención aguas abajo de una cámara de combustión que funciona con combustibles sólidos, preferiblemente el control de temperatura de vapor sobrecalentado tiene lugar modulando la temperatura de humos de entrada, recirculando humos fríos que salen del generador de vapor. Se ha encontrado de manera inesperada y sorprendente que mediante este procedimiento de control también pueden evitarse los problemas de contracción anteriormente mencionados. De hecho, tal como se menciona, en cualquier generador de vapor, el intercambio de calor tiene lugar con variaciones muy grandes de  $\Delta T$  (entre humos y agua/vapor), es decir,  $\Delta T$  muy baja en la zona de calentamiento de agua y muy alta en las zonas EVA y SH, con problemas de contracción ( $\Delta T$  que se reduce hasta valores que casi anulan el flujo de calor) en el límite entre las zonas ECO y EVA, cada vez que tienen lugar fluctuaciones (oscilaciones) incluso limitadas (a una carga aparentemente constante), lo que implica desequilibrios entre la zona ECO y las otras zonas.

30 Por el contrario, en los generadores de vapor de la invención, cuando se aplica la recirculación/adición de humos fríos a humos calientes (nota: el mezclado de humos recirculados calientes-fríos no altera el equilibrio de entalpía de la recuperación térmica), se logran las siguientes condiciones:

35 - a cargas equivalentes, pueden hacerse funcionar diversos pares de temperatura/caudal de humos, estando las temperaturas superiores asociadas con caudales inferiores hasta el límite de una recirculación de humos igual a cero, y estando temperaturas inferiores asociadas con caudales de recirculación gradualmente cada vez más significativas.

45 - el par de baja temperatura/alto caudal reduce el calor intercambiado en la zona SH y EVA, de modo que los humos alcanzan la zona ECO a un caudal superior y a una temperatura superior.

- viceversa, el par de alta temperatura/bajo caudal aumenta el calor intercambiado en la zona SH y EVA, sumando  $\Delta T$  superior e irradiación superior, de modo que los humos alcanzan la zona ECO a un caudal bajo y a una T inferior.

50 Por tanto, resulta evidente que el par de caudal/temperatura permite desplazar la carga entre las diversas zonas para proporcionar siempre la  $\Delta T$  requerida en el límite zona ECO-zona EVA ( $\Delta T$  nunca se reduce hasta valores inaceptables), garantizándose la superficie de intercambio de calor típica para las diversas zonas regulando la posición del punto de inflexión descrita anteriormente. Se ha observado de manera sorprendente e inesperada que la regulación de contracción anterior converge con la regulación de temperatura de la temperatura de vapor sobrecalentado producido.

55 En el generador de vapor de la invención la estabilidad de los perfiles de temperatura en un intervalo muy amplio permite alcanzar una buena solución también para los cabezales colectores del vapor sobrecalentado.

Se conoce bien en la técnica que los cabezales colectores del tubo tienen un alto espesor debido al diámetro mayor y a la alta temperatura nominal. Cuando se someten a un choque de temperatura repentino, también se someten a tensión por expansión térmica diferencial radial en el espesor de la pared, lo cual se añade a la tensión de las condiciones de funcionamiento continuas, generando fatiga oligocíclica (número de ciclos bajo) y aún así relevante. Esto implica limitación de la velocidad de aumento de carga y consiguiente limitación de la capacidad de ciclos.

El riesgo de choque térmico, que debe evitarse, representa por tanto uno de los elementos adicionales que limitan la respuesta rápida a variaciones de carga.

En el generador de vapor de la invención, el mantenimiento de perfiles de temperatura a lo largo de un amplio intervalo de funcionamiento (carga de desde el 5-10% hasta el 100%) permite identificar una posición axial a lo largo de la trayectoria de humos en la que la temperatura de los humos se mantiene a aproximadamente la temperatura del vapor sobrecalentado (por ejemplo de aproximadamente 600°C). Se ha encontrado que doblando los tubos en el extremo de la trayectoria de intercambio, apartándolos de los bancos de tubos bajando hasta el punto anteriormente mencionado, y preferiblemente colocando los cabezales de salida de vapor en el flujo de humo (figura 6 en una interrupción de los bancos de tubos), la deltaT entre la temperatura de pared metálica de cabezal y la temperatura de vapor producido se vuelve despreciable y es inferior a aproximadamente 100°C en todas las condiciones, eliminando así el problema de tensión/choque térmico. Además se ha verificado que, recogiendo en un haz, con contacto directo entre sí, las tuberías de los cabezales de división múltiple que salen del recipiente que contiene humo, y poniendo el aislamiento térmico sólo alrededor del haz completo, el calor dispersado por contacto/irradiación entre las tuberías es suficiente para llevar la temperatura de la tubería que no está en funcionamiento próxima a la temperatura de la que está en funcionamiento con flujo de vapor en su interior. Lo mismo también sucede en la porción del haz de tuberías fuera del generador de vapor.

Una de las realizaciones preferidas del generador de vapor de la invención es la disposición horizontal, tal como se representa en las figuras 11, 12, 13, 14. De hecho, si además de la simplicidad también se dispone de una fácil accesibilidad (para mantenimiento/inspección) y una estructura de acero de soporte reducida, que puede obtenerse con la disposición horizontal, el atractivo del generador de vapor de la invención es incluso más apreciable.

En el documento USP 7.406.928 la disposición horizontal del generador de vapor se obtiene disponiendo un serpentín horizontal con tubos ascendentes y descendentes rectos (tubo de subida y tubo de bajada en serie). Además también se expone una zona de precalentamiento del agua de entrada con humos calientes (con un alto flujo de calor) para garantizar una rápida velocidad de transferencia de calor, de modo que en la primera parte de bajada hay un caudal de fluido bifásico suficiente, que puede potenciar el arrastre por agua de burbujas de vapor vaporizado. La subida/bajada del tubo evita el establecimiento de condiciones no estacionarias (agua todavía presente muy por delante a lo largo del generador de vapor) del lado de agua-vapor, garantizándose posiblemente un caudal de fluido en volumen bifásico suficiente en la parte de vaporización incipiente con el fin de evitar la segregación de agua del flujo y el flujo tapón.

Sin embargo, la implementación de la disposición horizontal no cambia lo que se indicó anteriormente para los documentos USP 5.159.897 y USP 7.383.791, y como mucho introduce un nuevo elemento crítico de la central cuando se hace funcionar a cargas bajas.

El generador de vapor de la invención, con una disposición horizontal no sólo introduce las ventajas anteriores (accesibilidad y reducción de la estructura de acero), sino que mantiene inalteradas las ventajas anteriormente mencionadas de la disposición vertical para cargas de desde el 5-10% hasta el 100%.

Se ha encontrado de manera sorprendente e inesperada que la concepción del tubo de ascenso oblicuo también es válida para la disposición horizontal. De hecho, en la rotación del generador de vapor de 90° en la posición horizontal, realizada manteniendo horizontalmente los tubos del banco, se rota 90° la subida oblicua de cada tubo, que sigue siendo oblicua. O mejor aún, puede implementarse una realización que mantiene el ángulo oblicuo deseado, proporcionando con la misma una subida, esta vez en una dirección ortogonal al eje del generador de vapor, que corresponde en todos los aspectos a la subida obtenida en la disposición vertical cruzando de izquierda a derecha (o viceversa) a lo largo del eje del generador de vapor.

Observado a partir de una vista lateral, el desarrollo del tubo individual en los acodamientos de conexión entre las partes horizontales sigue, a lo largo del eje del generador de vapor, una trayectoria en forma de dientes de sierra (sube oblicuamente hasta el extremo de la parte de contención de humo y después discurre hacia abajo adoptando de nuevo la posición más baja en el otro extremo de la parte de contención; véase la figura 14). Esta trayectoria de subida en partes lleva a cabo globalmente el confinamiento de la trayectoria de agua/vapor que previene los movimientos bifásicos no estacionarios y por tanto mantiene el rendimiento deseable de la disposición vertical en subida para tener la flexibilidad de carga más amplia en el control de perfil de agua/vapor con una carga de desde el 5-10% hasta el 100%. Además, la disposición horizontal ofrece al ingeniero de proyecto los mayores grados de libertad para obtener una buena eficiencia de intercambio de calor por m<sup>2</sup> de superficie. Por ejemplo, pueden disponerse diversas velocidades de humo a través de los bancos de tubos, modificando la inclinación y la longitud del tubo, y la velocidad de agua/vapor ajustando el diámetro de tubo, sin que se observen restricciones debidas a requisitos de dinámica de fluidos particulares dentro de los tubos. Una disposición todavía más preferida del

generador de vapor de la invención se logra cuando los humos calientes están a presión y por tanto el intercambio debe tener lugar con humos contenidos dentro de un recipiente de presión.

5 En lo que respecta a la etapa e), es decir el mantenimiento, en todas las condiciones de presión del vapor producido, de una primera parte, o la totalidad, del generador de vapor en condiciones de presión supercrítica seguido por el estrangulamiento cuando la entalpía del fluido permite aguas abajo del estrangulamiento la transferencia directa del fluido supercrítico a la fase de vapor sin cruzar por el área de fluido bifásica de agua/vapor (figura 7D), debe observarse que la etapa e) se usa opcionalmente para el funcionamiento habitual del generador de vapor, es decir para cargas superiores al 5-10%. El solicitante ha encontrado de manera sorprendente e inesperada que el procedimiento de la etapa e), con un estrangulamiento final en lugar de uno intermedio, también puede usarse preferiblemente en la fase de arranque del generador de vapor, justo después del primer calentamiento con tubos secos. Con referencia a la figura 15 se lleva a cabo el arranque para mantener las condiciones en la salida del generador de vapor fuera del área de evaporación (zona mixta bifásica) seleccionando la presión de funcionamiento de modo que en una primera fase se subenfía el agua que sale del generador de vapor (por debajo de la temperatura de saturación a la presión de funcionamiento) y, tras pasar la zona de evaporación en la zona de presión supercrítica, se sobrecalienta el vapor (por encima de la temperatura de saturación a la presión de funcionamiento). En las fases iniciales se estrangula el agua y se transporta a un tanque de expansión. Cuando el agua a la salida de la cabeza del generador de vapor tiene una entalpía de aproximadamente 150 kJ/kg superior a la entalpía de vapor saturado (a la presión de admisión en la turbina), se inyecta en el circuito de arranque de la turbina.

20 En particular el solicitante ha encontrado de manera sorprendente e inesperada que las modalidades de la etapa e) también pueden usarse preferiblemente en la fase de arranque del generador de vapor. De hecho, se ha encontrado un procedimiento particularmente rápido y sumamente deseado desde un punto de vista industrial. El procedimiento de arranque comprende las siguientes etapas de procedimiento:

- calentamiento inicial de tubos secos, es decir sin agua, de todas las ramificaciones,  
 25 - alimentación de los tubos de sólo una ramificación con agua a presión supercrítica, preferiblemente de 240-280 bares,

- calentamiento con humos calientes y estrangulamiento cuando el agua a la salida de la cabeza del generador de vapor tiene una entalpía de aproximadamente 150 kJ/kg, superior a la entalpía de vapor saturado (es decir superior a la línea de vapor, que está fuera del área de evaporación 157 de la figura 16) a la presión de entrada de la turbina, o mediante calentamiento del fluido de modo que el estrangulamiento produce siempre y únicamente vapor sobrecalentado (figura 16); es decir que el vapor sobrecalentado está fuera de la zona bifásica de agua/vapor del área de evaporación 157 de la figura 16,

30 - una vez alcanzada una condición de carga igual al 30% de la ramificación usada, se accionan controles por realimentación, tal como se describe en el generador de vapor de la invención y que pueden configurar el esquema de control de perfil de temperatura para la ramificación en servicio.

Las ventajas de este procedimiento de arranque son la alimentación de carga muy rápida, la producción sólo de vapor, el control del intervalo de carga de desde el 0 hasta el 30% de la ramificación con una lógica de regulación diferente (a partir del control de perfil de temperatura) y sin embargo muy sencilla, es decir controlando la temperatura de vapor la válvula de estrangulamiento final, configuración anticipada de los dispositivos de control de regulación por realimentación. Las condiciones de control de perfil son excepcionalmente rápidas.

A continuación en el presente documento se describen con más detalle las figuras anteriormente mencionadas.

La figura 1 es una vista en perspectiva desde arriba del recorrido de tubo en un generador de vapor vertical de la invención.

La figura 2 representa el recorrido de un tubo en un generador de vapor vertical de la invención.

45 La figura 3 es una vista de frente del generador de vapor de la figura 1.

La figura 4 es una vista de frente del tubo de la figura 2.

La figura 5 muestra la alimentación de ramificaciones independientes en una realización del generador de vapor de la invención. En el caso mostrado a modo de ejemplo en la figura se muestran tres circuitos independientes.

50 La figura 6 representa esquemáticamente un generador de vapor según la invención con intercambio de calor en contracorriente pura con humos que entran desde la parte superior y agua alimentada desde la parte inferior.

La figura 7A es un diagrama de presión-temperatura-entalpía que muestra el calentamiento en condiciones supercríticas del fluido de agua/vapor a una carga del 100%.

La figura 7B muestra en un diagrama de presión-temperatura-entalpía el calentamiento en condiciones subcríticas

del fluido de agua/vapor a una carga del 50%, representativo para las cargas parciales de un generador de vapor.

La figura 7C muestra en un diagrama de presión-temperatura-entalpía el calentamiento en condiciones supercríticas del fluido de agua/vapor a una carga del 50% (representativo para las cargas parciales de un generador de vapor), y el posterior estrangulamiento en la entrada de la turbina de vapor.

5 La figura 7D muestra en un diagrama de presión-temperatura-entalpía el calentamiento en condiciones supercríticas del fluido de agua/vapor, la posterior disminución de presión mediante estrangulamiento del propio fluido sin formación de mezcla agua/vapor bifásica y el sobrecalentamiento del vapor subcrítico.

La figura 8 representa un gráfico de la temperatura de: los humos, el fluido de agua/vapor a una carga del 100% como función de la superficie de intercambio de calor del generador de vapor.

10 La figura 9 comparativa representa un gráfico de la temperatura de: los humos, el fluido de agua/vapor como función de la superficie de intercambio de calor a una carga reducida en el caso de la técnica anterior sin limitación y exclusión parcial de la superficie de intercambio de calor.

La figura 10 muestra un gráfico en un generador de vapor de la invención de la temperatura de: los humos y el fluido de agua/vapor a una carga del 100% como función de la superficie de intercambio de calor a una carga reducida con limitación por división triple de superficie y con sólo una ramificación en servicio.

15 La figura 11 es una vista en perspectiva que muestra el recorrido de los tubos en un generador de vapor horizontal según la presente invención.

La figura 12 muestra el recorrido de un tubo en un generador de vapor horizontal según la invención.

La figura 13 es una vista de frente del generador de vapor de la figura 11.

20 La figura 14 es una vista de frente del tubo de la figura 12.

La figura 15 muestra en un diagrama de presión-temperatura-entalpía la zona de arranque del generador de vapor de la invención con fluido en la salida del generador de vapor en condiciones monofásicas.

La figura 16 muestra en un diagrama de presión-temperatura-entalpía el método de arranque preferido del generador de vapor de la invención manteniendo siempre el fluido en condiciones supercríticas y estrangulamiento fluido a un valor de entalpía tal como para obtener sólo vapor en condiciones para admisión en la turbina.

25 Las siguientes figuras se describen en detalle.

La figura 1 es una imagen tridimensional de bancos de tubos (2) de un generador de vapor dispuesto verticalmente de la invención, con alimentación de agua desde la parte inferior y humos 16 que entran desde la parte superior (salida de humo 16A). Los tubos de intercambio individuales, véase por ejemplo el tubo 13, al girar tras una parte rectilínea horizontal, no sólo cambian de un plano al superior, por ejemplo del plano 11 al plano superior 12 de la figura, sino que a la vez también cambian lateralmente hacia la izquierda. Una vez que llegan al límite del recipiente que contiene humos (no mostrado en la figura) en el extremo izquierdo de la figura, el tubo en la posición 14 gira y, cruzando el banco de tubos, adopta el lugar 15, en el extremo derecho del recipiente.

La figura 2 representa un extracto de la figura 1 en el que sólo se representa un tubo 13. 17 es la entrada de agua en la parte inferior del banco de tubos y 18 representa la salida del fluido en la parte superior del banco de tubos.

La figura 3 muestra una vista de frente de un banco de tubos de un generador de vapor vertical con alimentación de agua desde la parte inferior ya descrita en la figura 1. El tubo de intercambio de calor individual, por ejemplo el tubo 13, al girar, no sólo cambia de un plano al superior (por ejemplo del plano 11 al plano superior 12), sino que también cambia lateralmente hacia la izquierda (figura 2). Una vez que llega al límite del recipiente que contiene humo (no mostrado en la figura) en el extremo izquierdo de la figura, los tubos giran en la posición 14 y, cruzando el banco de tubos, se insertan en la posición 15, en el extremo derecho del recipiente.

La figura 4 muestra, en la misma vista de frente que la figura 3, sólo el tubo 13 aislado de la parte restante del banco de tubos, tal como se describió en la figura 1 y la figura 2. El tubo de intercambio de calor, al girar, cambia de un plano al superior y también lateralmente a la izquierda. Una vez que llega al límite del recipiente que contiene humo (no mostrado en la figura) en el extremo izquierdo de la figura, el tubo gira en la posición 14 y, cruzando el banco de tubos, adopta la posición 15, en el extremo derecho del recipiente.

La figura 5 muestra un banco de tubos del tipo descrito en la figura 1, en una vista de frente como en la figura 3, formado por 30 tubos en el plano horizontal. Los 30 tubos se alimentan de manera alterna por tres cabezales separados mediante la apertura de válvulas 531, 532, 533. Por tanto, hay tres circuitos separados, cada uno separado por 10 tubos (alimentados en paralelo). Los tubos 51, 54, 57, 510, 513, 516, 519, 522, 525, 528, en los que pasa agua/vapor cuando se abre la válvula 531, pertenecen al primer circuito. En el segundo circuito están los tubos 52, 55, 58, 511, 514, 517, 520, 523, 526, 529, por los que pasa un flujo de agua/vapor cuando se abre la válvula

532. En el tercer circuito están, de la ramificación restante, los tubos 53, 56, 59, 512, 515, 518, 521, 524, 527, 530 con la válvula relacionada 533 que regula el flujo de los mismos con agua/vapor. En la figura hay una representación esquemática del sistema de alimentación separada para cada circuito, con las válvulas reguladoras de flujo de cada circuito. Como ejemplo, con la válvula 531 abierta y las válvulas 532 y 533 cerradas, sólo hay flujo de agua/vapor en los tubos del primer circuito (tubos 51, 54, 57, 510, 513, 516, 519, 522, 525, 528). Con los tubos de los diferentes circuitos reunidos juntos y dispuestos para la subida oblicua del banco de tubos, hay una absorción uniforme del flujo de calor en los diversos circuitos cuando se alimentan todos los circuitos. Cuando no se alimentan una o más ramificaciones, las temperaturas alcanzadas por sus tubos se limitan a la temperatura de humos promedio, por los tubos cercanos de los circuitos en funcionamiento (uno o más). De hecho, los circuitos alimentados mantienen localmente humos, que también entran en contacto con los tubos de los circuitos que no están en funcionamiento, en el perfil de temperatura nominal óptimo.

La figura 6 representa un tipo de generador de vapor de la invención con disposición vertical, con humos 61 que entran desde la parte superior (y salida 61A) y agua que entra desde la parte inferior (a través de los cabezales 62, 63, 64). El esquema de intercambio de calor es el de contracorriente pura. Por tanto, se representan tres circuitos separados 65, 66, 67, cada uno configurado con un cabezal de entrada (en la figura, el cabezal 62 alimenta al circuito 65, el cabezal 63 al circuito 66, el cabezal 64 alimenta al circuito 67), tubos de intercambio de calor (en la figura se indica un tubo de intercambio de calor para un circuito) y cabezales de salida de vapor (en la figura el cabezal 68 para la extracción de vapor del circuito 65, el cabezal 69 para el circuito 66, el cabezal 610 para el circuito 67). Los cabezales 68, 69, 610 pueden colocarse tanto fuera del recipiente que contiene humos 611 (opción no indicada en la figura) como en los propios humos en una posición en la que la temperatura de humos es próxima a la de vapor (opción preferida, mostrada en la figura).

Debe observarse que los tubos están ininterrumpidos, desde los cabezales de entrada hasta los cabezales de salida. Alternativamente (realización no mostrada en la figura), puede disponerse de cabezales intermedios (colocados de manera adecuada antes y/o después de la zona de evaporación o pseudoevaporación). Alternativamente (realización no mostrada en la figura), puede disponerse de fases de recalentamiento de vapor a presión intermedia vertido desde la turbina o más fases de recalentamiento de vapor a una presión diferente. Alternativamente (realización no mostrada en la figura), pueden disponerse fases de sobrecalentamiento.

La figura 7A representa, en un diagrama de presión-temperatura-entalpía para el agua en condiciones supercríticas, la trayectoria de calentamiento desde agua a alta densidad (de tipo agua) hasta un fluido a densidad inferior (de tipo vapor), denominado vapor supercrítico sobrecalentado, a una carga del 100%. Esta transición tiene lugar en una de las realizaciones de generador de vapor de la invención. En el diagrama, pueden identificarse cuatro zonas (o regiones), indicadas en la figura con 71, 72, 73 y 74. La zona 71 representa el agua subenfriada; se representa mediante el tramo por debajo del área de evaporación (zona 72), cuando la presión es inferior a la presión crítica (alrededor de 221 bares). La zona 72, denominada zona de evaporación, es la región, para una presión inferior al valor crítico, en la que están presentes tanto agua líquida como vapor. Por encima de la zona 72 (siempre presiones inferiores a la presión crítica) sólo está presente vapor (zona 73). La zona 74 comprende agua en condiciones superiores a la presión crítica. El agua a entalpía baja y densidad alta (de tipo agua) en las condiciones representadas por el punto 75, experimenta una pseudoevaporación (transición de estado en ausencia de formación de mezcla líquido/vapor) representada por los puntos de la línea comprendida entre los puntos 75 y 76. En el punto 76 el agua tiene una entalpía alta y una densidad baja (de tipo vapor), como para alimentarse a la turbina.

La figura 7B representa, en un diagrama de presión-temperatura-entalpía para el agua, el calentamiento desde agua subenfriada en condiciones subcríticas hasta vapor sobrecalentado a presión subcrítica a una carga del 50% (carga parcial). Esta transición tiene lugar en una de las realizaciones de generador de vapor de la invención, realizándose la variación de carga en modalidad de presión deslizante. En el diagrama se muestran cuatro zonas (o regiones), indicadas en la figura con 71, 72, 73 y 74 y descritas en la figura 7A. El agua subenfriada en las condiciones representadas por el punto 77 experimenta la evaporación (transición de estado mediante formación de las mezclas líquido/vapor) representada por los puntos de la línea comprendida entre los puntos 77 y 78. En 78 el vapor sobrecalentado a presión subcrítica está en las condiciones para alimentarse a la turbina.

La figura 7C representa, en un diagrama de presión-temperatura-entalpía para el agua, el calentamiento desde agua subenfriada en condición supercrítica hasta vapor supercrítico sobrecalentado a una carga del 50% (carga parcial). Esta transición tiene lugar en una de las realizaciones de generador de vapor de la invención que se hacen funcionar en modalidad de presión constante. En el diagrama se muestran cuatro zonas (o regiones), indicadas en la figura con 71, 72, 73 y 74 y descritas en la figura 7A. El agua subenfriada, en las condiciones representadas por el punto 79, experimenta la pseudoevaporación (corresponde a la transición de estado anterior, pero sin formación de la mezcla líquido/vapor) representada por los puntos de la línea comprendida entre los puntos 79 y 710. En 710 el vapor sobrecalentado, a presión supercrítica, sale del generador de vapor y se estrangula (estrangulamiento desde el punto 710 hasta el punto 711) con el fin de tener en 711 las condiciones de presión adecuadas para su admisión en la turbina.

La figura 7D representa, en un diagrama de presión-temperatura-entalpía (H-T-p) para el agua, la trayectoria de calentamiento desde agua a alta densidad (de tipo agua) en condiciones supercríticas hasta un fluido a densidad inferior (de tipo vapor), denominado vapor sobrecalentado subcrítico, y la disminución de presión sucesiva mediante

5 estrangulamiento del vapor sin formación de una mezcla bifásica agua/vapor. Estas transiciones (calentamiento y estrangulamiento) tienen lugar en una de las realizaciones de generador de vapor de la invención. En el diagrama se muestran cuatro zonas, indicadas en la figura con 71, 72, 73 y 74 y descritas en la figura 7A. El agua de entalpía baja y densidad alta (de tipo agua) en las condiciones representadas en el punto 712, experimenta la pseudoevaporación (transición de estado sin formación de la mezcla líquido/vapor) representada por el tramo comprendido entre los puntos 712 y 713. En 713 el agua tiene una entalpía alta y densidad baja (de tipo vapor). Mediante estrangulamiento (transición representada por los puntos comprendidos entre 713 y 714), a través de una o más válvulas, se disminuye la presión del agua sin tener la formación de mezcla líquido/vapor típica de la zona 72, sino que pertenece a la zona 73 de vapor sobrecalentado. La transformación representada por el tramo entre 714 y 715 es el sobrecalentamiento de vapor subcrítico, que tiene lugar en la parte terminal (parte terminal a lo largo de la trayectoria de agua/vapor) del generador de vapor.

15 En la figura 8 se muestra, al 100% de la carga del generador de vapor y en condiciones supercríticas del fluido de agua/vapor, el gráfico de la temperatura: del humo (curva 81) y del agua/vapor (curva 82), como función de la superficie de intercambio de calor. En la figura, se representan tres zonas: la primera, desde la izquierda, incluye la superficie de intercambio de calor en la que tiene lugar el sobrecalentamiento de fluido (zona 83). La zona 84 es la superficie de intercambio de calor en la que tiene lugar la pseudoevaporación. La zona 85 representa la zona en la que está la superficie de intercambio de calor para el precalentamiento de fluido (ECO). La curva "recta-discontinua" 86 es la envolvente de las temperaturas nominales de las diversas secciones de la superficie de intercambio de calor del generador de vapor.

20 En la figura 9 se representa, a una carga parcial (aproximadamente el 10% de la carga máxima) del generador de vapor en condiciones subcríticas, el gráfico de la temperatura de: los humos (curva 91) y del agua/vapor (curva 92) como función de la superficie de intercambio. El generador de vapor no se hace funcionar con división de superficie de intercambio mediante exclusión de ramificaciones, tal como se describe en la figura 5. En la figura se notifican las tres zonas (83, 84, 85) descritas en la figura 8. Debe observarse el efecto de la sobreabundancia de superficie de intercambio de calor; provoca, a una carga parcial, un desplazamiento de la zona EVA hacia la zona ECO 85, en la que se usan materiales menos caros y menos resistentes a la alta temperatura en la caldera USC de la técnica. La curva "recta-discontinua" 86 es la envolvente de las temperaturas nominales, definidas para la plena carga, de las diversas secciones de la superficie de intercambio de calor. También debe observarse cómo la temperatura de agua/vapor (curva 91) alcanza los mismos valores que la temperatura de humos (curva 92) para la mayor parte de la superficie de intercambio de calor. Además la curva de agua/vapor 91 se aproxima y también supera la curva 86 de las temperaturas nominales para materiales de la técnica.

35 En la figura 10, a una carga parcial (aproximadamente el 10% de la carga máxima, la misma considerada en la figura 9) del generador de vapor, en condiciones subcríticas, se representa un gráfico, como función de la superficie de intercambio de calor disponible, de temperaturas de humos (curva 101), del agua/vapor del circuito en funcionamiento (curva 102) y del agua/vapor en los dos circuitos secos (curva 103). De hecho, se hace funcionar el generador de vapor con división de superficie mediante exclusión de algunos circuitos o ramificaciones. En el ejemplo de la figura hay tres circuitos (tal como también se muestran en la figura 5), de los cuales sólo se alimenta uno. En la figura, están presentes las tres zonas (83, 84, 85) descritas en la figura 8. Merece la pena observar cómo la exclusión de una parte de la superficie (en el ejemplo se excluyen dos tercios de la superficie total) provoca, también a una carga parcial, que la zona de transición bifásica del circuito en funcionamiento permanezca en la zona 84, en la que también tiene lugar la pseudoevaporación a plena carga. En la curva segmentada 86, como en la figura 8, se encuentra la "envolvente" de las temperaturas mecánicamente admisibles (nominales) de las diversas secciones de la superficie de intercambio de calor. Las temperaturas de los dos circuitos excluidos (no en funcionamiento) están próximas a la temperatura de humos, condición mostrada en la figura por el solapamiento de las curvas 101 (humos) y 103 (agua/vapor en los circuitos secos). Tanto las temperaturas de humos (curva 101) como las del agua/vapor de los tres circuitos (curvas 102 y 103) son inferiores a las temperaturas nominales de la curva 86. En otras palabras, el circuito en funcionamiento mantiene el perfil de temperatura de humos en su sitio y protege los circuitos que no están en funcionamiento frente a sobrecalentamiento del metal por encima de temperaturas nominales. El gráfico de temperatura de humos y el de agua/vapor son similares al gráfico de los mismos parámetros notificado en la figura 8.

40 La figura 11 representa, mediante una imagen tridimensional con una vista de abajo arriba, la trayectoria de los tubos en un banco de tubos, en la disposición horizontal. Los humos 116 fluyen a través del banco de tubos desde la derecha hacia la izquierda (salida de humo 116A). Merece la pena observar que los tubos (por ejemplo el tubo de color negro 113 para seguir mejor la trayectoria del mismo), tras una parte rectilínea horizontal, terminan con curvas que los cambian al plano sucesivo, pero también hacia el extremo superior del banco de tubos. Los tubos describen una trayectoria en forma de dientes de sierra.

55 La figura 12 representa un caso particular de la figura 11, en el que sólo se representa el tubo 113. Se muestran la entrada de agua 117 y la salida de agua/vapor 118.

60 En la figura 13 se muestra una vista de frente del generador de vapor descrito en la figura 11. El tubo de intercambio de calor individual, por ejemplo el tubo mencionado 113 (de color negro para mostrarse mejor), mediante curvado, no sólo cambia de un plano al siguiente (por ejemplo del plano 111 al plano 112), sino que también cambia hacia la

parte superior del generador de vapor. Una vez que llega al límite del recipiente que contiene humos (no mostrado en la figura), el tubo se curva a la posición 114 y, cruzando el banco de tubos, adopta la posición opuesta 115, en el extremo inferior del cuerpo.

5 La figura 14 muestra, en la misma vista de frente que la figura 13, sólo el tubo 113 de la figura 12, ocultando todos los demás tubos.

10 La figura 15 representa, en el diagrama H-T-p ya descrito en la figura 7, la curva recta-discontinua que pasa por los puntos 151, 152, 153, 154, 155, 156. Se pretende que la posición en la gráfica de estos puntos sea un ejemplo y no una indicación precisa de los límites de la curva discontinua que los cruza. Los puntos de esta curva (desarrollada alrededor del área de evaporación de la mezcla bifásica 157), aquellos a la derecha de la curva y sobre los puntos 155 y 156 representan las condiciones aceptables del agua/vapor que sale del circuito cuando se arranca el generador de vapor, ya que la modalidad de arranque descrita sólo prevé en la salida del generador de vapor fluido monofásico.

15 La figura 16 representa, en un diagrama de H-T-p (véase la figura 7) con las zonas de arranque indicadas por la curva segmentada que pasa por los puntos 151, 152, 153, 154, 155, 156 de la figura 15, una de las modalidades de arranque preferidas del generador de vapor de la invención, manteniendo siempre el fluido en condiciones supercríticas hasta un nivel de entalpía, de modo que el estrangulamiento de fluido sólo produce vapor, con características adecuadas para su admisión directa en la turbina. El agua en condiciones supercríticas a baja temperatura (punto 158) se calienta hasta el punto 159. En 159 el agua tiene una entalpía tal que, tras el estrangulamiento (transformación entre el punto 159 y 156), se evita la zona de evaporación 157.

20 El generador de vapor de la invención permite, tal como se mencionó anteriormente, solucionar el problema de "ciclos", ya que es muy rápido en el arranque y en el aumento/disminución de carga de energía dentro de la capacidad nominal.

25 Los generadores de vapor de la invención reaccionan rápidamente a variaciones de carga, y especialmente a cargas bajas, y en particular inferiores a aproximadamente el 30%, porque superan los problemas debidos a desviación de perfiles de temperatura amplios, a lo largo de la trayectoria de agua/vapor, de los de carga máxima. El generador de vapor de la invención puede resistir la extensión, hacia una porción muy grande de la trayectoria del tubo, de temperaturas próximas a la temperatura de los humos calientes entrantes. Por este motivo, no se necesita el uso, para una porción grande de la superficie de intercambio de calor, de materiales de alta aleación para tubos (aleaciones con un alto contenido en níquel y otros metales valiosos). De esta manera se reduce el coste del generador de vapor de la presente invención en comparación con otros generadores de vapor de la técnica anterior.

De hecho, en los generadores de vapor de la invención:

35 - Puede aumentarse o reducirse rápidamente la carga en un amplio intervalo de carga con operaciones llevadas a cabo con una lógica de control constante, que para los generadores de vapor significa mantener los perfiles de temperatura de humos y del agua/vapor, es decir en la misma alineación y posición geométrica en el generador de vapor, condición conocida en la técnica anterior como condición de perfil de temperatura constante, o como "control de perfil". La flexibilidad de esta realización, que se pretende que se interprete como aumento o reducción de carga rápida, con sistemas de regulación que funcionan con una lógica de regulación constante, también tiene lugar para cargas inferiores al 30%.

40 En los funcionamientos bajo el límite de una carga de aproximadamente el 30% en los generadores de vapor de la invención se mantiene el control de perfil y puede hacerse funcionar el generador de vapor con control de perfil de temperatura automatizado, constante a lo largo de todo el intervalo de carga inferior al 30%, tanto aumentando como disminuyendo, además de rápidos arranques y paradas.

45 Por tanto los generadores de vapor de la invención muestran una alta flexibilidad y pueden fabricarse de materiales incluso de una calidad comparable a los usados en generadores de vapor USC tradicionales, es decir que la porción de longitud de tubos de materiales de alta aleación es muy limitada. Además, los generadores de vapor de la invención también pueden expandir la flexibilidad hacia las cargas bajas (<30%), hasta el límite próximo a una condición en espera nocturna económicamente aceptable (carga al menos inferior al 10%, preferiblemente superior o igual al 5%), en una modalidad de control de "perfil" de temperatura constante, lista para aumentar rápidamente hasta carga máxima según las demandas, también con combustibles, como carbón, que se han limitado históricamente a centrales de energía que dan servicio a la producción continua próxima a su capacidad.

50

**REIVINDICACIONES**

1. Generador de vapor que comprende:
  - tubos de agua/vapor que pasan a través del generador de vapor desde la entrada de agua (62, 63, 64) hasta la salida de vapor sobrecalentado (68, 69, 610), en el que
- 5
  - los tubos de agua/vapor están dispuestos horizontalmente en bancos de tubos, preferiblemente bancos de tubos planos, atravesados perpendicularmente por los humos (61),
  - los tubos ascienden a lo largo del eje del generador de vapor desde un banco de tubos hasta el otro, con una trayectoria oblicua para exponerse al flujo de humo (61) en diferentes posiciones para cada banco de tubos,
- 10
  - los tubos están divididos en dos o más ramificaciones separadas (65, 66, 67), alimentándose cada ramificación por un cabezal distinto de los otros,
  - el generador de vapor es de un solo paso en contracorriente pura, vertical u horizontal,
  - los cabezales (68, 69, 610) del vapor sobrecalentado de salida están agrupados en contacto directo en un haz y el haz está térmicamente aislado del exterior.
- 15 2. Generador de vapor según la reivindicación 1, en el que los cabezales están ubicados en el flujo de humo, en una posición tal que los humos están a una temperatura próxima a la temperatura de vapor sobrecalentado.
3. Generador de vapor según las reivindicaciones 1 y 2, en el que opcionalmente se modula la temperatura de humos calientes de entrada recirculando los humos fríos tras la recuperación de calor, opcionalmente, están presentes una o más secciones de recalentamiento, que funcionan con vapor vertido a presión intermedia desde la turbina, opcionalmente están presentes uno o más niveles de presión y fase de recalentamiento.
- 20 4. Generador de vapor según las reivindicaciones 1-3, en el que los tubos de agua-vapor pasan preferiblemente a través del generador de vapor desde la entrada de agua hasta la salida de vapor sobrecalentado sin entradas ni salidas intermedias, más preferiblemente sin interrupción, y los tubos de agua/vapor están fabricados de materiales usados en generadores de vapor USC (ultrasupercrítico) convencionales.
- 25 5. Generador de vapor según las reivindicaciones 1-4, en el que la última porción de tubo, en la que se realiza el sobrecalentamiento de vapor final, está fabricada de material de alta aleación.
- 30 6. Generador de vapor según las reivindicaciones 1-5, cuando el vapor sale a 605°C a una presión de 240-280 bares, la longitud de la sección del material de alta aleación es de aproximadamente el 10% de la longitud del tubo del generador de vapor.
7. Generador de vapor según las reivindicaciones 1-6, en el que los tubos de agua/vapor dispuestos en bancos de tubos planos, atravesados perpendicularmente por humos, tienen una longitud de tubo horizontal rectilínea inferior a 12 m, preferiblemente inferior a 6 metros.
- 35 8. Generador de vapor según las reivindicaciones 1-7, en el que el generador de vapor de un solo paso es un generador de vapor vertical en contracorriente pura, preferiblemente con la entrada de humos desde la parte superior y la entrada de agua desde la parte inferior.
9. Generador de vapor según las reivindicaciones 1-8, en el que el generador de vapor de un solo paso es un generador de vapor horizontal en contracorriente pura.
- 40 10. Procedimiento para hacer funcionar el generador de vapor según las reivindicaciones 1-9 a cargas de desde el 5-10% hasta el 100% que comprende las siguientes etapas:
  - mantener los perfiles de temperatura de los humos y del agua/vapor en la misma alineación y la misma posición geométrica del generador de vapor,
  - limitar la superficie de intercambio de calor de modo que el funcionamiento a cargas bajas, inferiores a aproximadamente el 30%, tiene lugar excluyendo, y después manteniendo en una condición seca, una o más ramificaciones de tubo, hasta el límite de tener sólo una ramificación en funcionamiento.
- 45 11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que el mantenimiento del perfil de temperatura de humos y de agua/vapor, en la misma alineación y la misma posición geométrica a lo largo del eje del generador de vapor, se realiza mediante dos o más de los siguientes procedimientos:
  - a) limitar la superficie de intercambio de calor, y, para cargas inferiores a la carga de presión deslizante
- 50

- mínima del 30%, excluir y después mantener en un estado seco una o más ramificaciones, hasta el límite de tener sólo una ramificación en funcionamiento,
- 5 b) controlar por realimentación, cambiando el control para la desviación a partir del estado estacionario, el caudal de alimentación de agua a cualquier carga manteniendo la posición, a lo largo del generador de vapor, del punto de inflexión de la temperatura cuando pasa a través de condiciones críticas para cargas que requieren condiciones supercríticas, y de la vaporización isotérmica para cargas que requieren condiciones de presión subcrítica, en la presión deslizante,
- 10 c) controlar por realimentación la temperatura de vapor producido a cualquier carga, ajustando la temperatura de humo caliente mediante recirculación de humos fríos para la zona aguas abajo, cuando se da servicio a una unidad de combustión de combustible sólido,
- d) controlar por realimentación la temperatura de humo en la salida del generador de vapor, actuando sobre el precalentamiento de agua de alimentación.
12. Procedimiento según la reivindicación 11, en el que el mantenimiento de perfiles de temperatura se lleva a cabo usando las etapas b) y c).
- 15 13. Procedimiento según la reivindicación 11 que comprende además la etapa e):
- mantener, en todas las condiciones de presión del vapor producido, la primera sección del generador de vapor en condiciones de presión supercrítica, seguido por estrangulamiento, cuando la entalpía del fluido es tal que permite, aguas abajo del estrangulamiento, la transformación directa del fluido supercrítico en la fase de vapor, sin cruzar el área mixta de fluido de agua/vapor bifásica subcrítica.
- 20 14. Procedimiento según las reivindicaciones 10-13, en el que la velocidad de aumento, o disminución, de carga tiene lugar con control por alimentación anticipada.
15. Procedimiento según las reivindicaciones 10-14, en el que para el generador de vapor el límite de espera en la condición de control de perfil de temperatura es de aproximadamente el 5-10% de la carga térmica.
- 25 16. Procedimiento según la reivindicación 15, en el que el 30% es la carga mínima de la ramificación en funcionamiento, para alcanzar la carga global deseada del 5-10%.
17. Procedimiento según las reivindicaciones 10-16, en el que el mantenimiento del perfil de temperatura, en el lado de humo y el lado de agua/vapor, se obtiene tomando un tubo del cabezal de cada ramificación para formar pares, tríos, conjuntos de cuatro grupos, etcétera, de tubos de ramificación, de modo que todos de dichos tubos de ramificación están siempre agrupados de manera contigua.
- 30 18. Procedimiento según las reivindicaciones 10-17, en el que la subida oblicua del tubo para ocupar la posición del tubo contiguo en el siguiente banco de tubos implica que el tubo que ha alcanzado la posición más externa de un banco de tubos vuelve al otro extremo de banco de tubos cruzando toda la parte frontal del banco de tubos.
- 35 19. Procedimiento según las reivindicaciones 10-18, en el que, en el caso de instalación del generador de vapor aguas abajo de una cámara de combustión que funciona con combustibles sólidos, el control por realimentación de la temperatura de vapor sobrecalentado tiene lugar modulando la temperatura de humos entrantes, recirculando los humos que salen del generador de vapor.
- 40 20. Procedimiento según las reivindicaciones 10-19, en el que los cabezales de salida de vapor están colocados en el flujo de humos, y además, opcionalmente, recogiendo en un haz, con contacto directo entre sí, las tuberías que llevan la salida de cabezales de división múltiple fuera del recipiente que contiene humo, y poniendo el aislamiento térmico sólo alrededor del haz completo.
21. Procedimiento según las reivindicaciones 10-20, en el que los humos calientes están a presión.
- 45 22. Procedimiento según las reivindicaciones 10-21, en el que en la fase de arranque del generador de vapor se adopta el procedimiento de la etapa e), es decir, se usa una laminación final en lugar de una laminación intermedia.
- 50 23. Procedimiento según la reivindicación 22, en el que la etapa de arranque se lleva a cabo para mantener las condiciones en la salida del generador de vapor fuera del área de agua/vapor bifásica, seleccionando la presión de funcionamiento de modo que en una primera fase se subenfria el agua que sale del generador de vapor por debajo de la temperatura de saturación a la presión de funcionamiento y, tras pasar por el área bifásica al área de presión supercrítica, se sobrecalienta el vapor por encima de la temperatura de saturación a la presión de funcionamiento; laminándose el agua en las fases iniciales y transportándose a un tanque de expansión, y, cuando el agua, a la salida del generador de vapor, tiene una entalpía de aproximadamente 150 kJ/kg superior a la entalpía de vapor saturado a la presión de admisión en la turbina,

se introduce en el circuito de partida de la turbina.

24. Procedimiento según las reivindicaciones 22-23, en el que el procedimiento de arranque comprende las siguientes etapas:

- secar por calentamiento inicialmente los tubos, es decir sin agua, de todas las ramificaciones,

5 - alimentar los tubos sólo de una ramificación con agua a presión supercrítica, preferiblemente 240-280 bares,

10 - calentar con humos calientes y laminación de agua, cuando el agua a la salida de la cabeza del generador de vapor tiene una entalpía de aproximadamente 150 kJ/kg superior a la entalpía de vapor saturado a la presión de entrada de la turbina, o calentando el fluido de modo que la laminación produce siempre, y únicamente, vapor sobrecalentado,

- una vez alcanzada una condición de carga igual al 30% de la ramificación individual usada, se accionan los controles por realimentación, tal como se describe para la configuración del control de perfil de temperatura del generador de vapor.

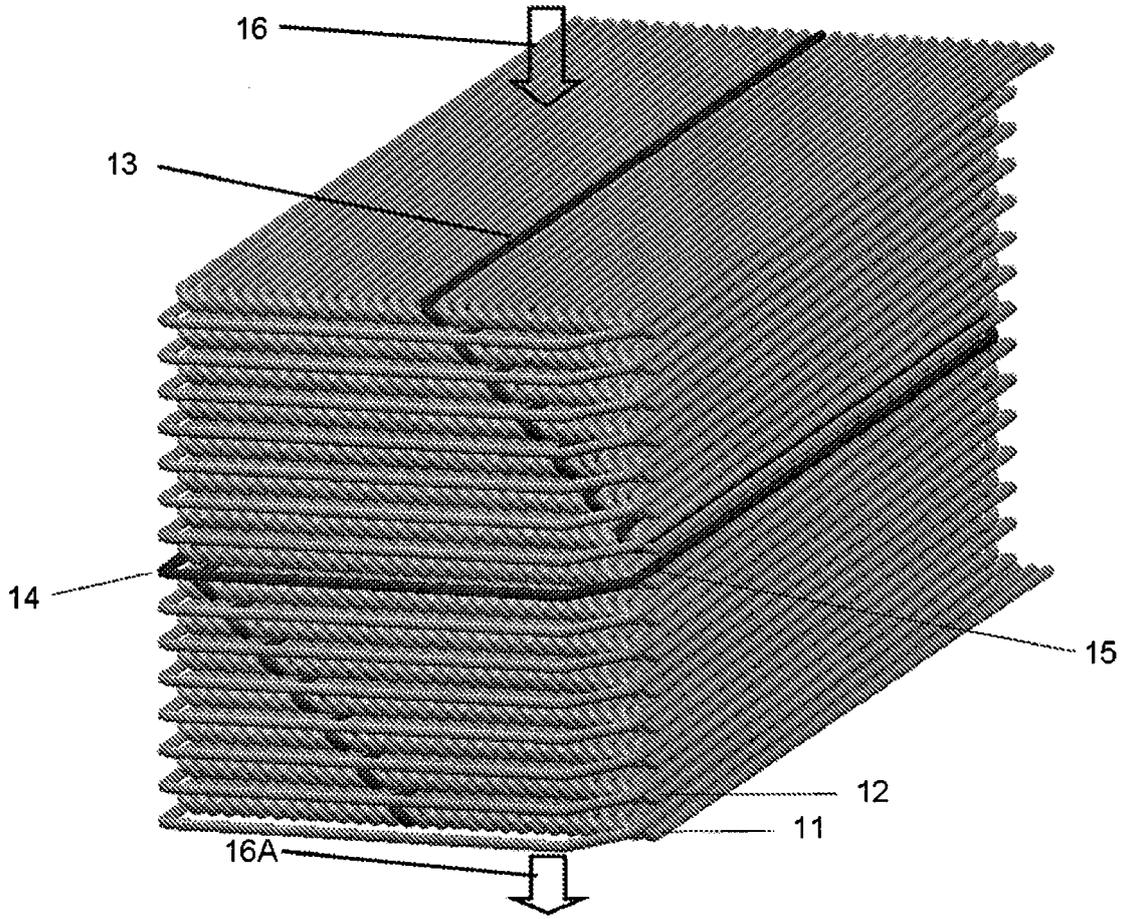


Fig. 1

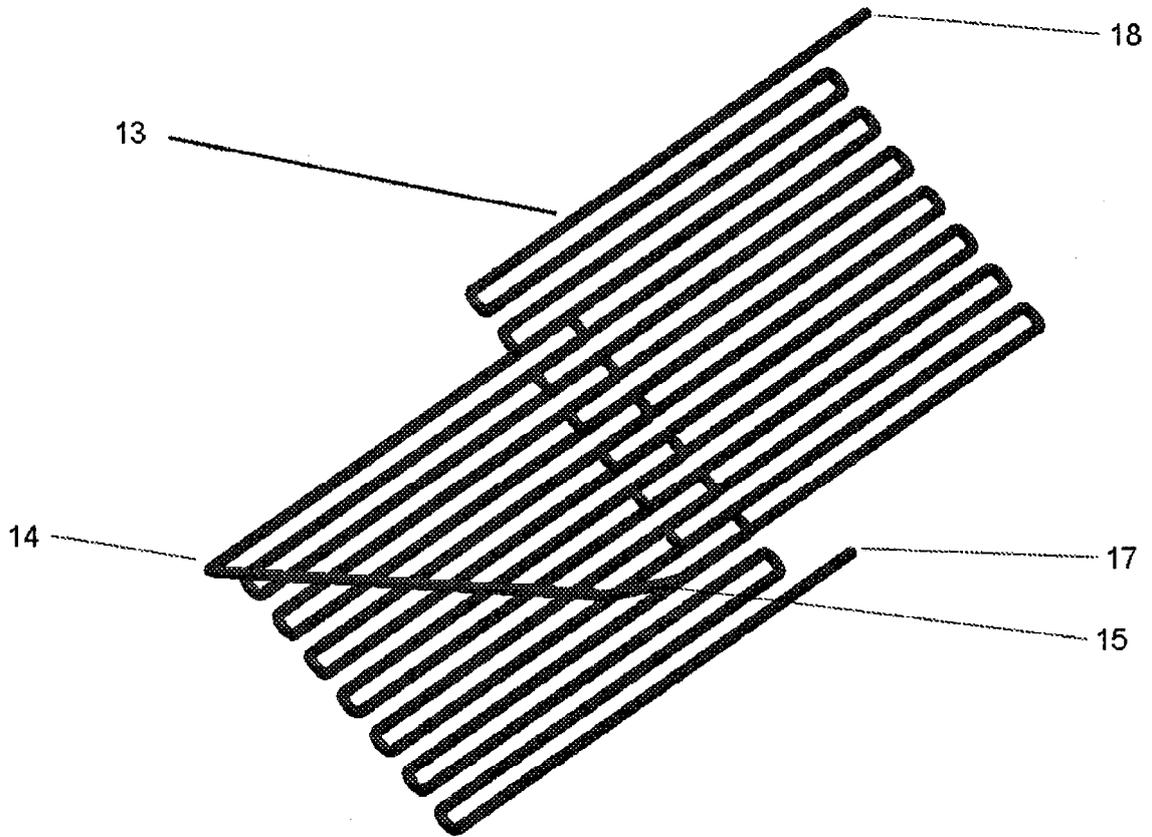


Fig. 2

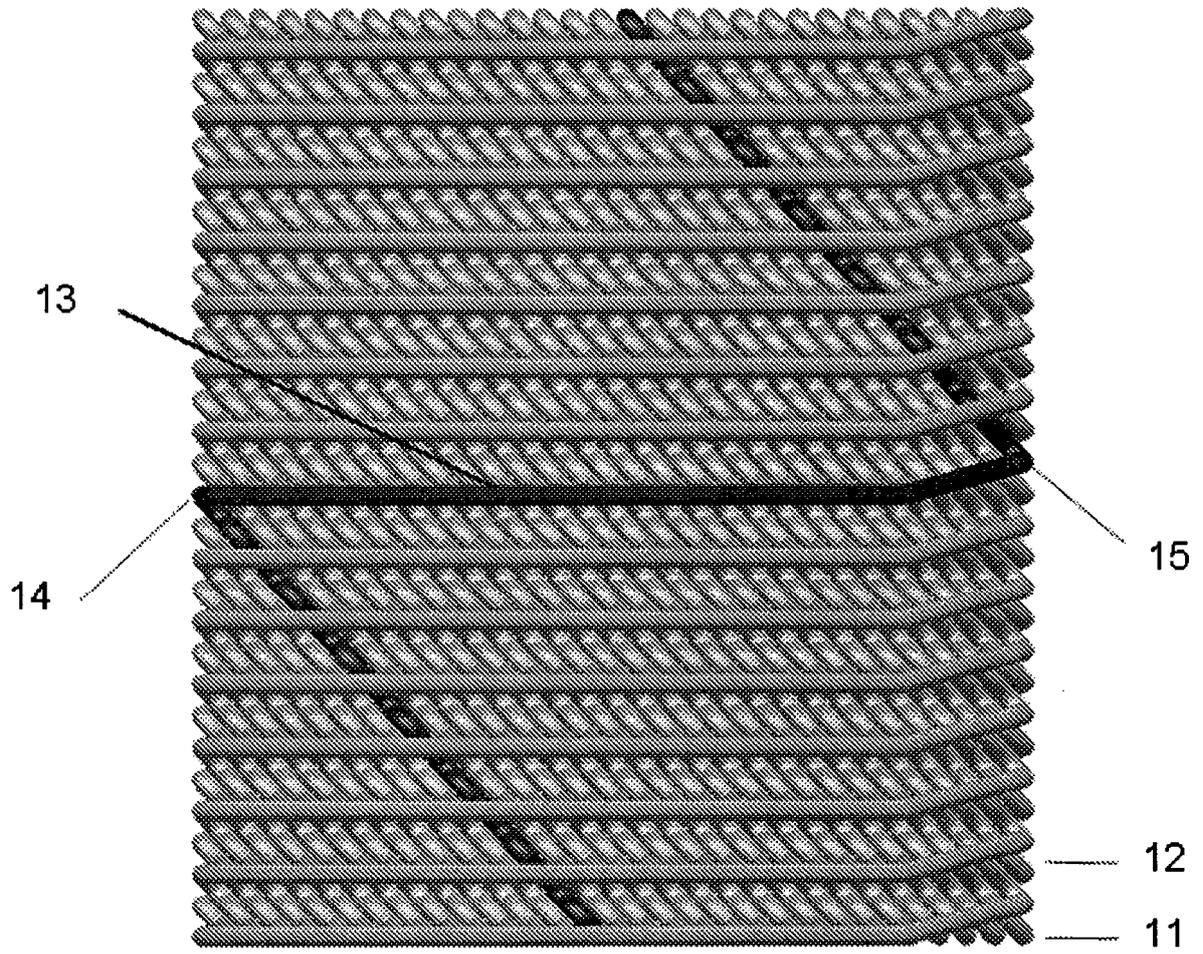


Fig. 3

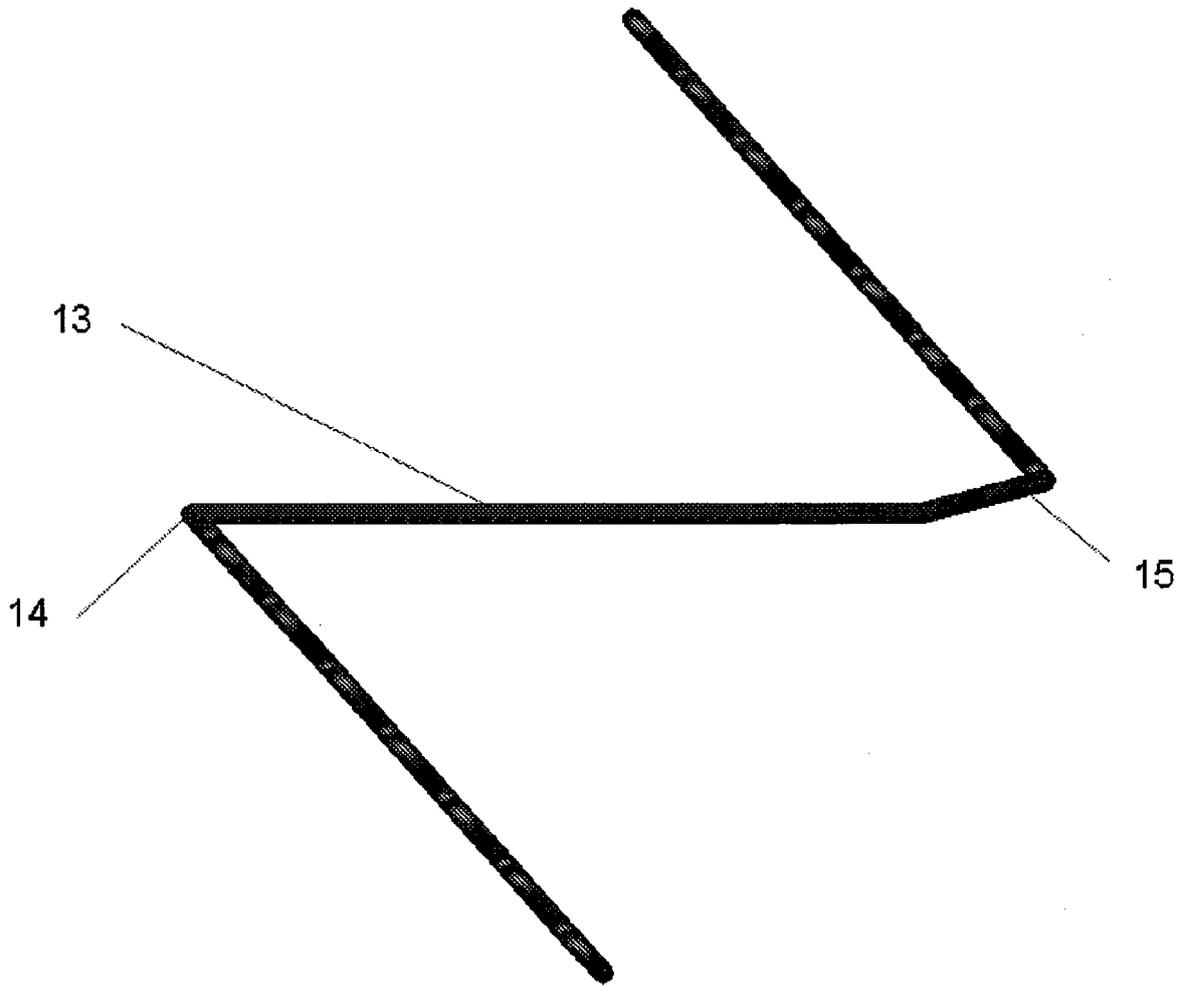


Fig. 4

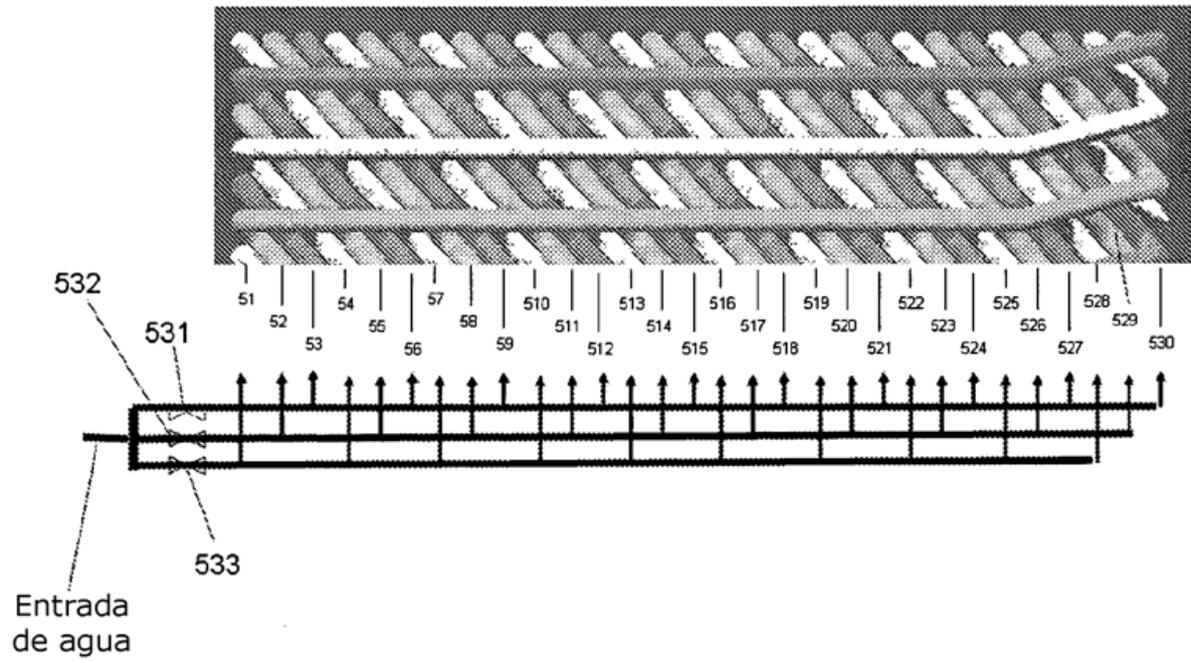


Fig.5

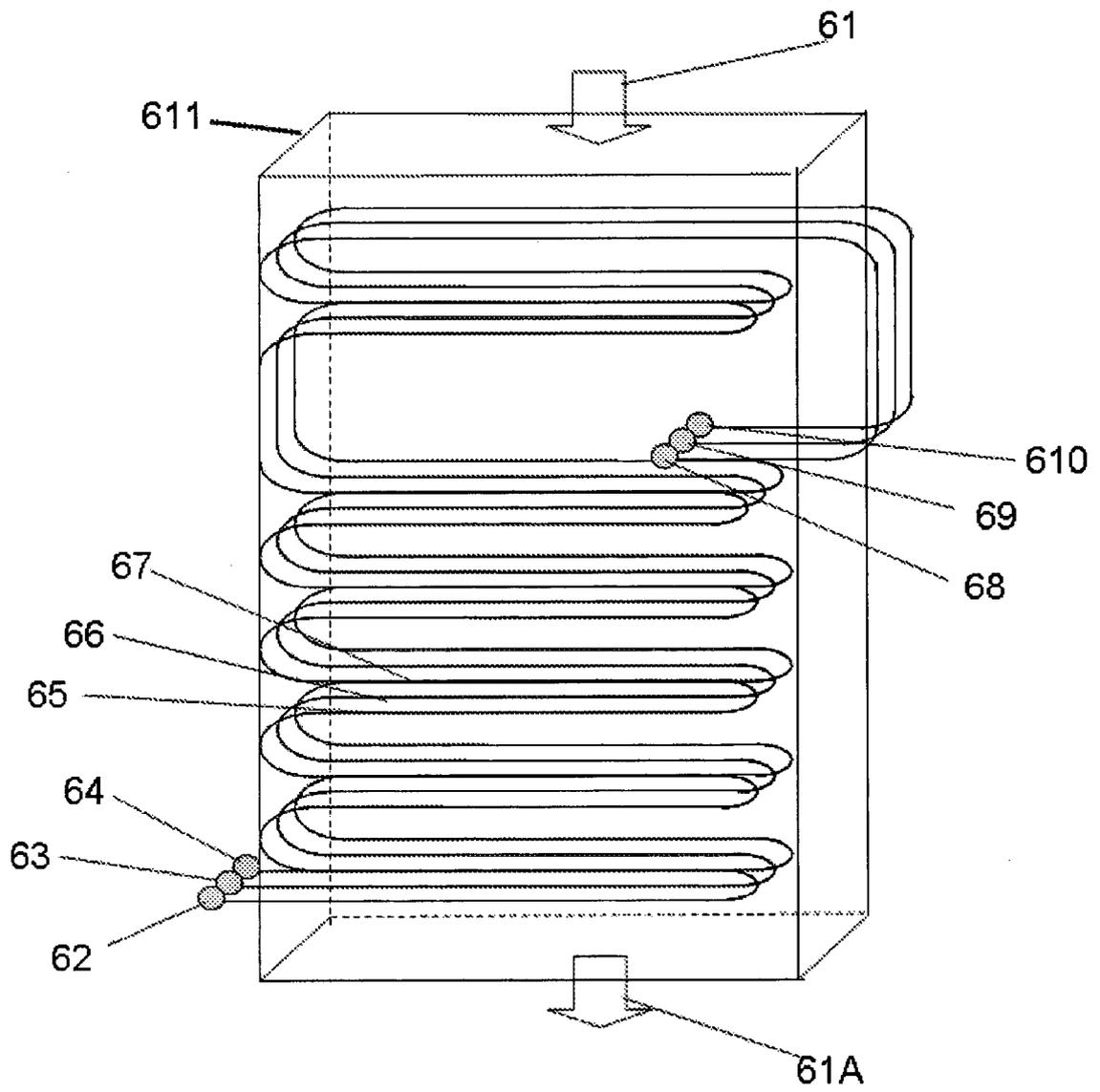


Fig. 6

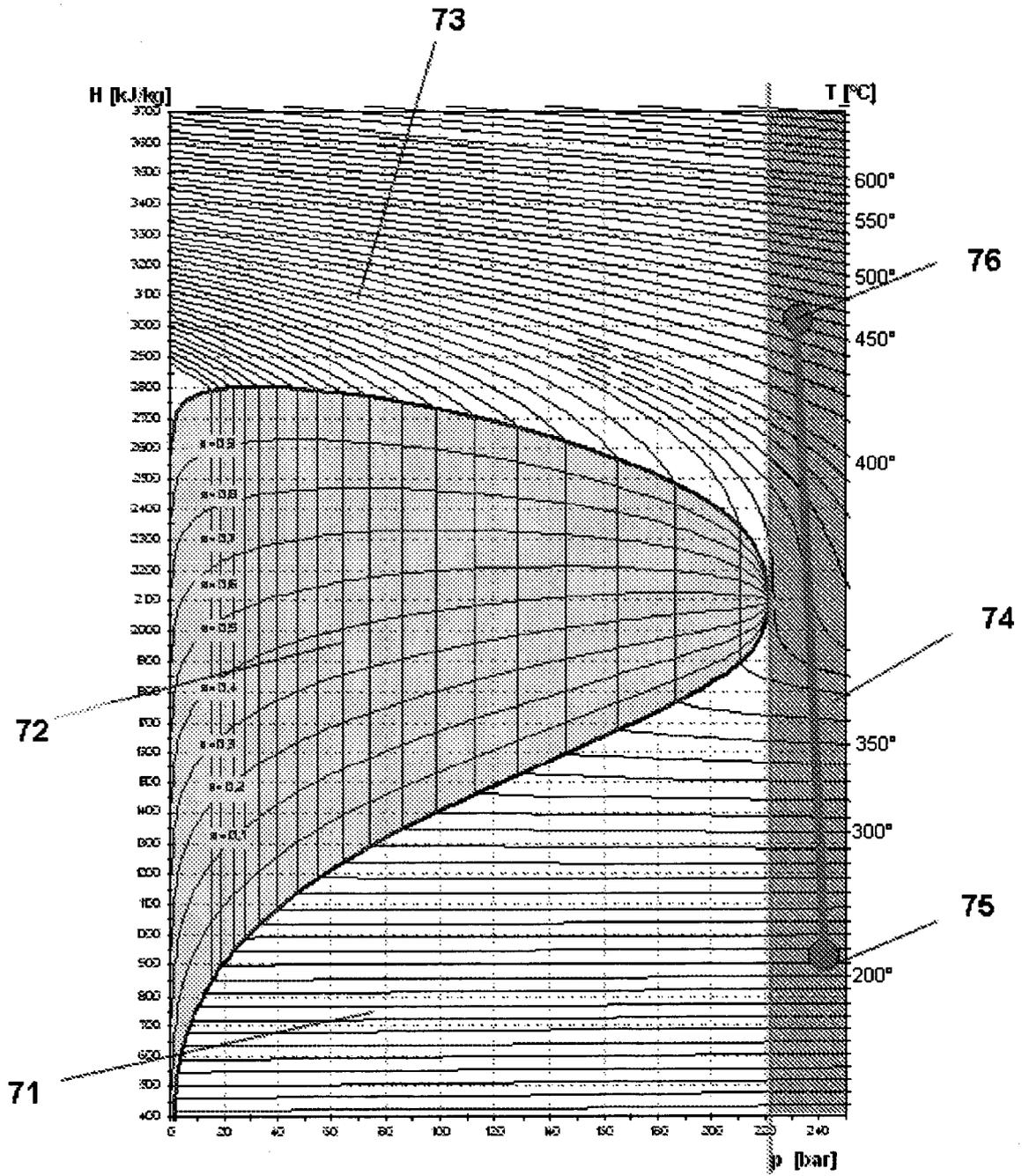


Fig. 7A

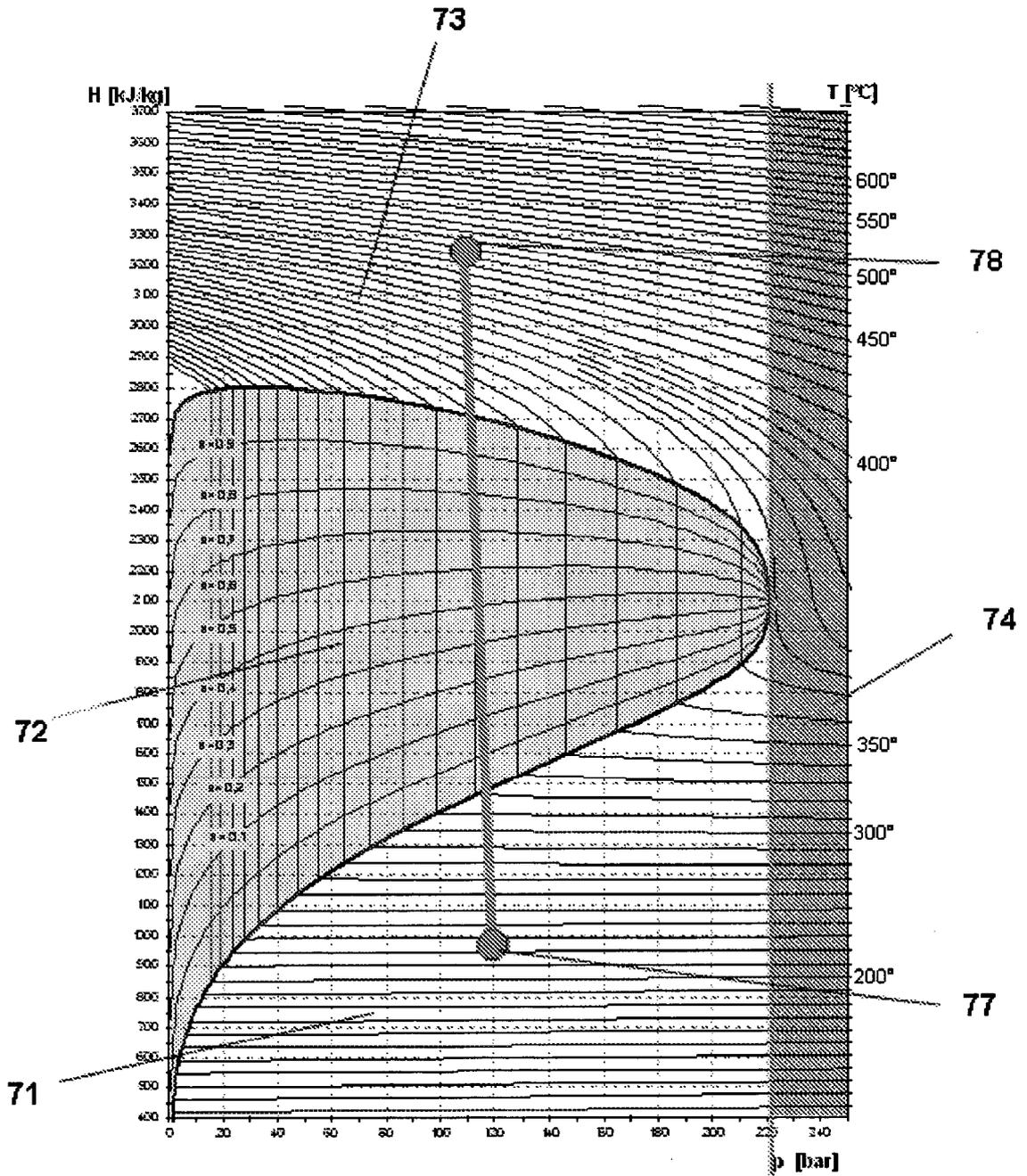


Fig. 7B

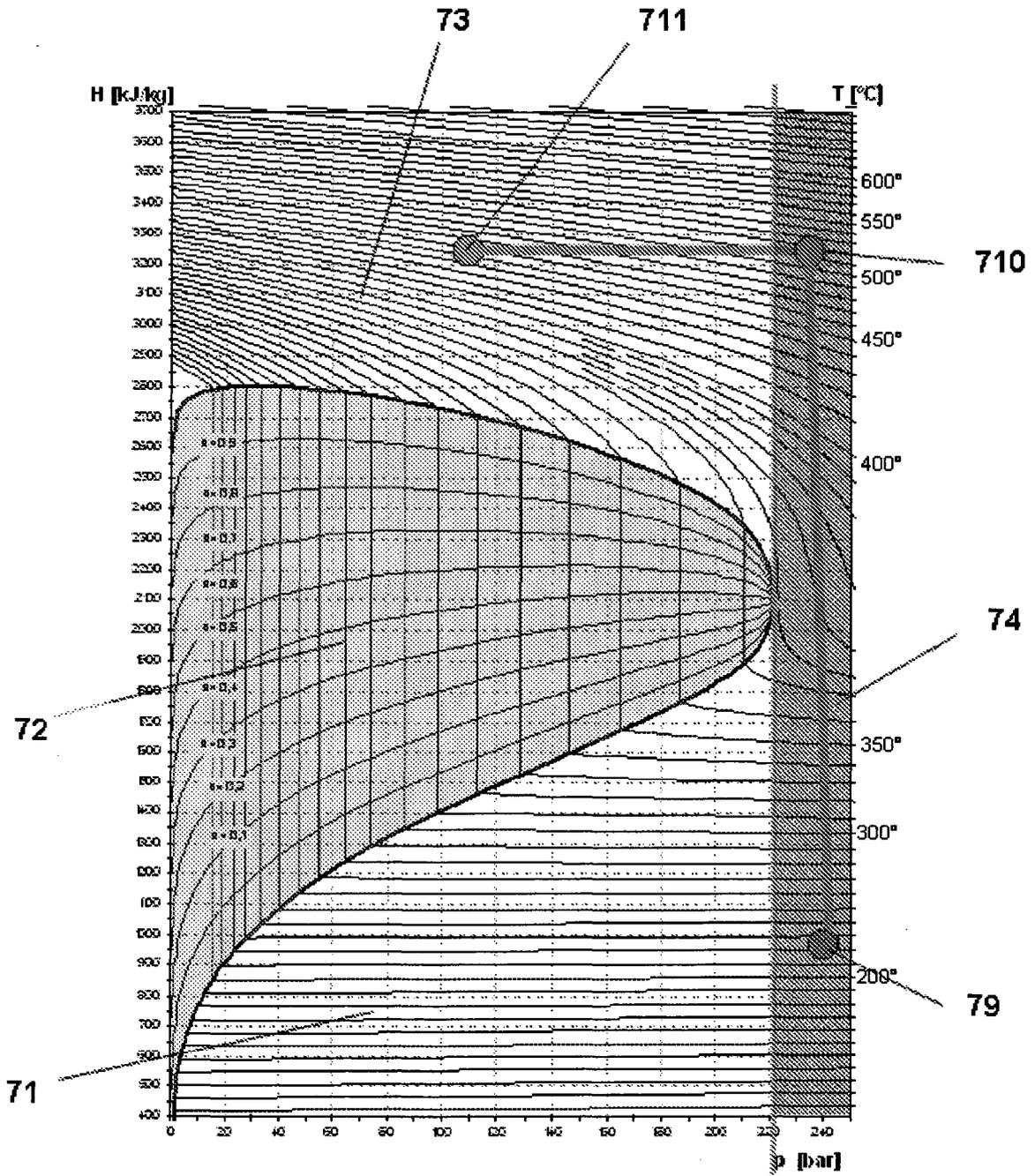


Fig. 7C

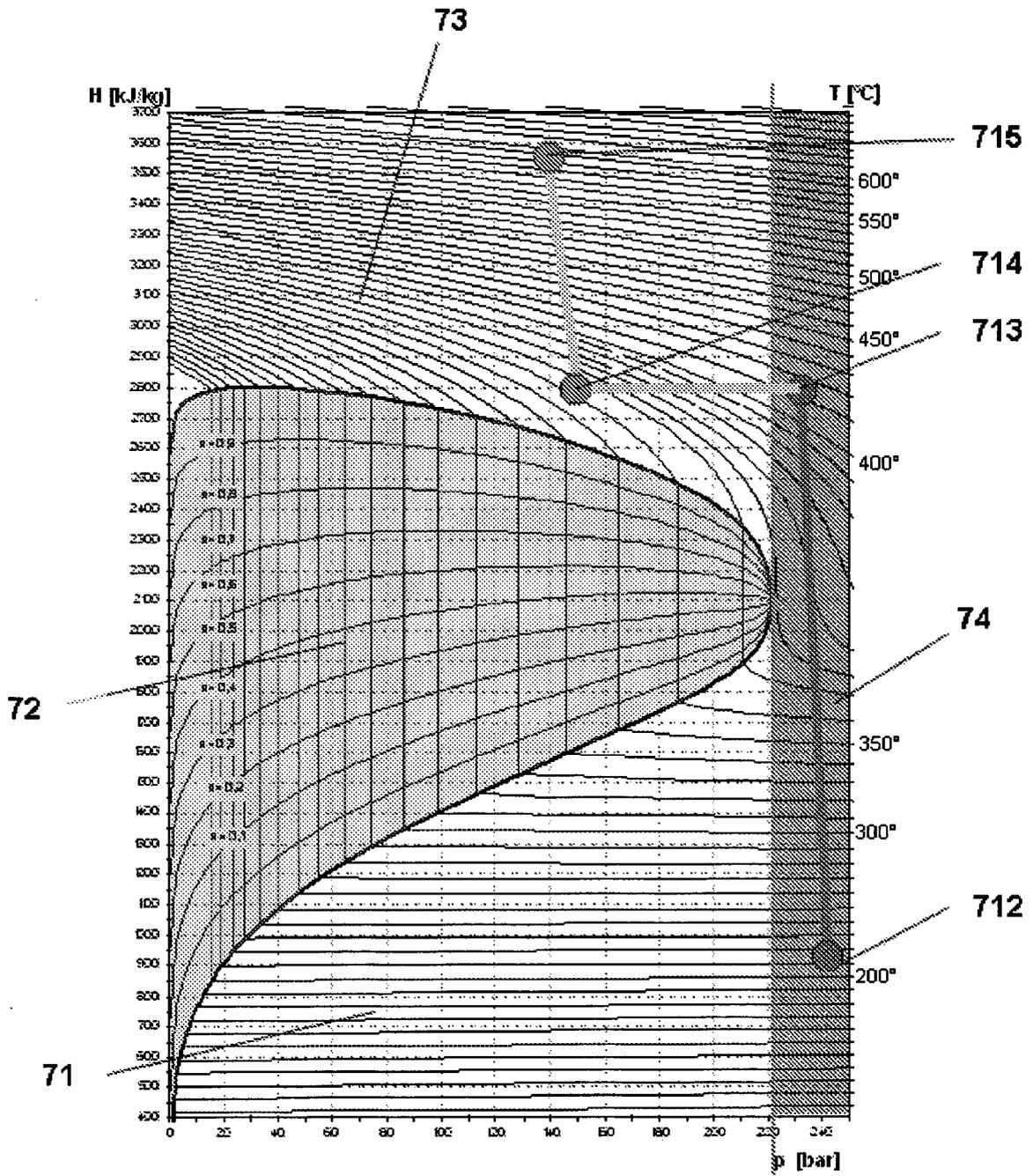


Fig. 7D

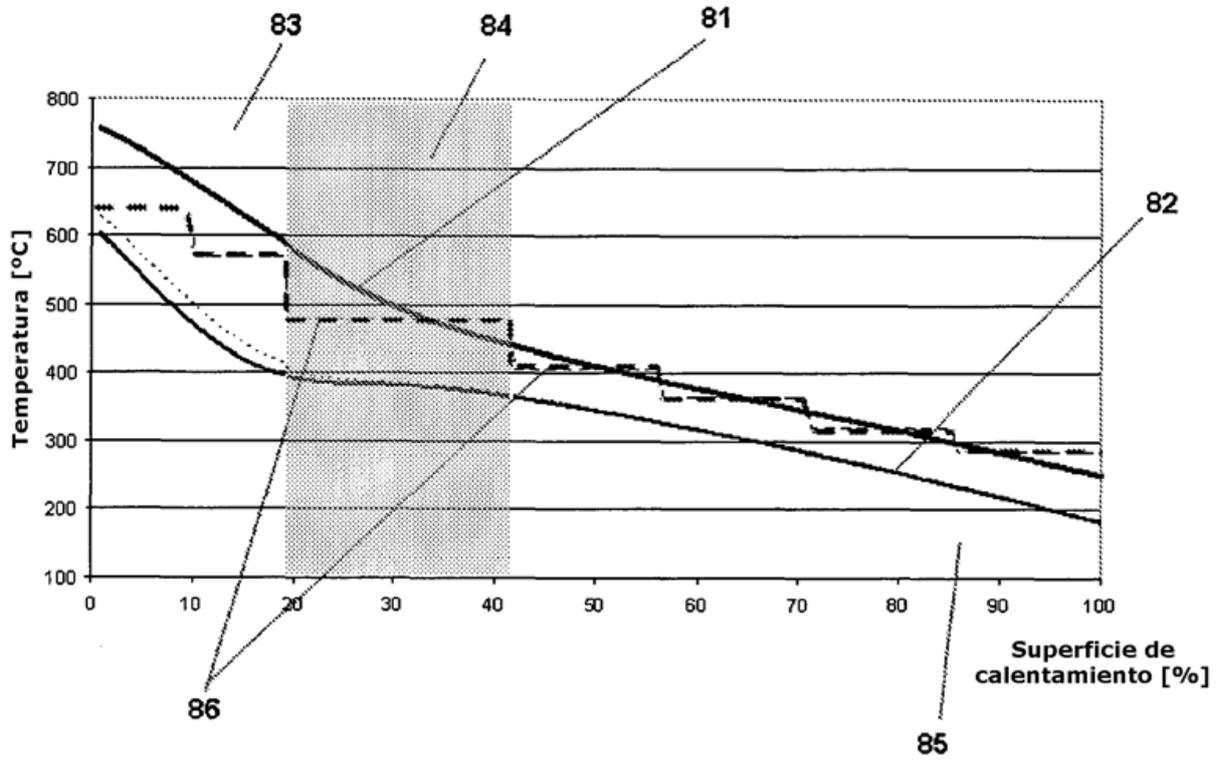


Fig. 8

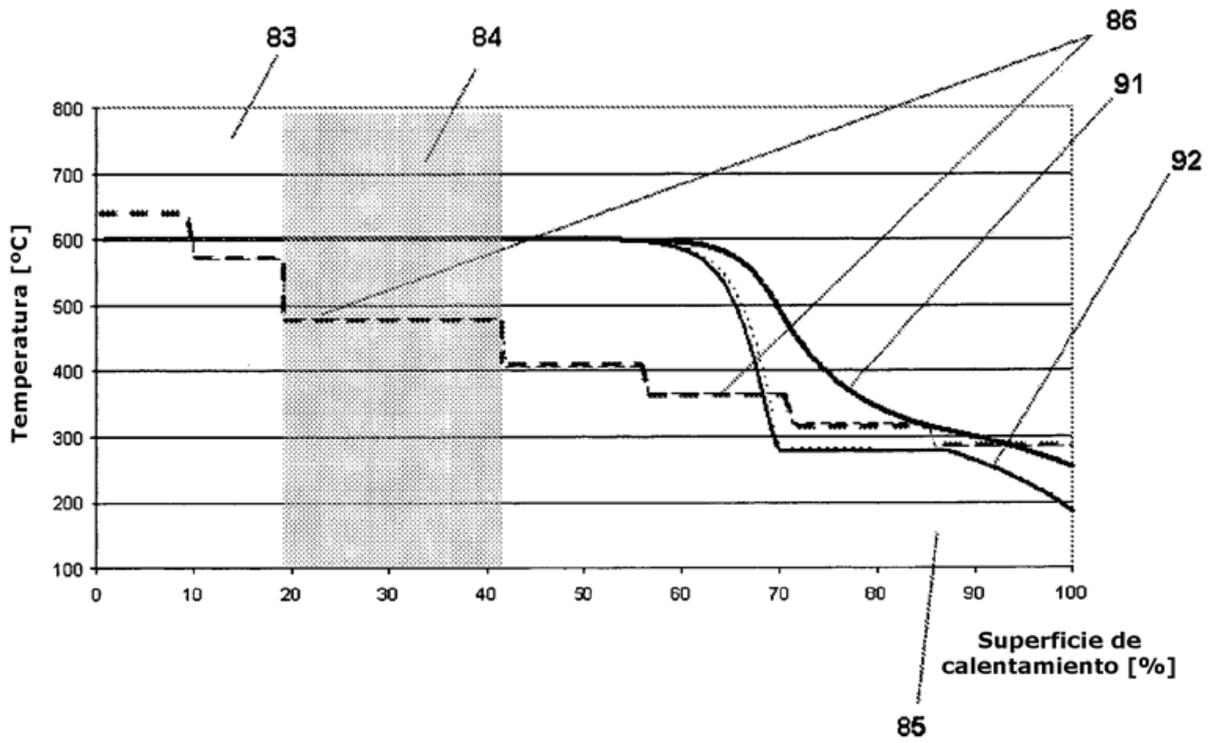


Fig.9

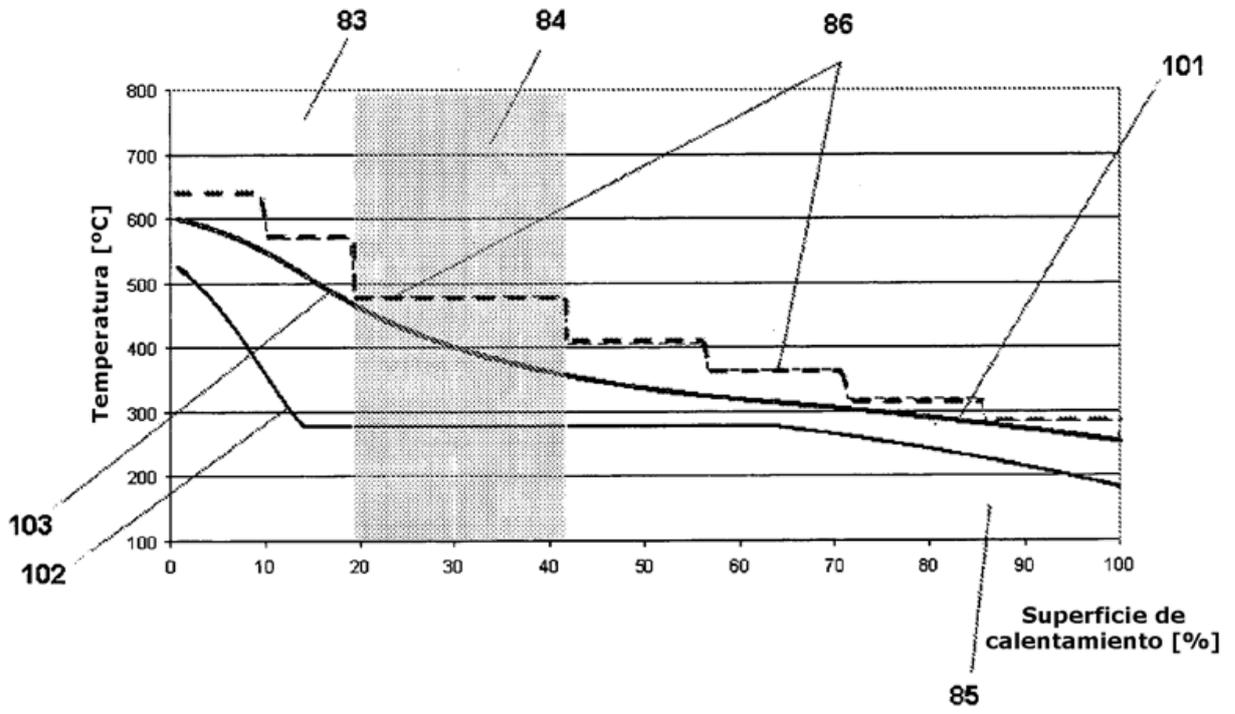


Fig.10

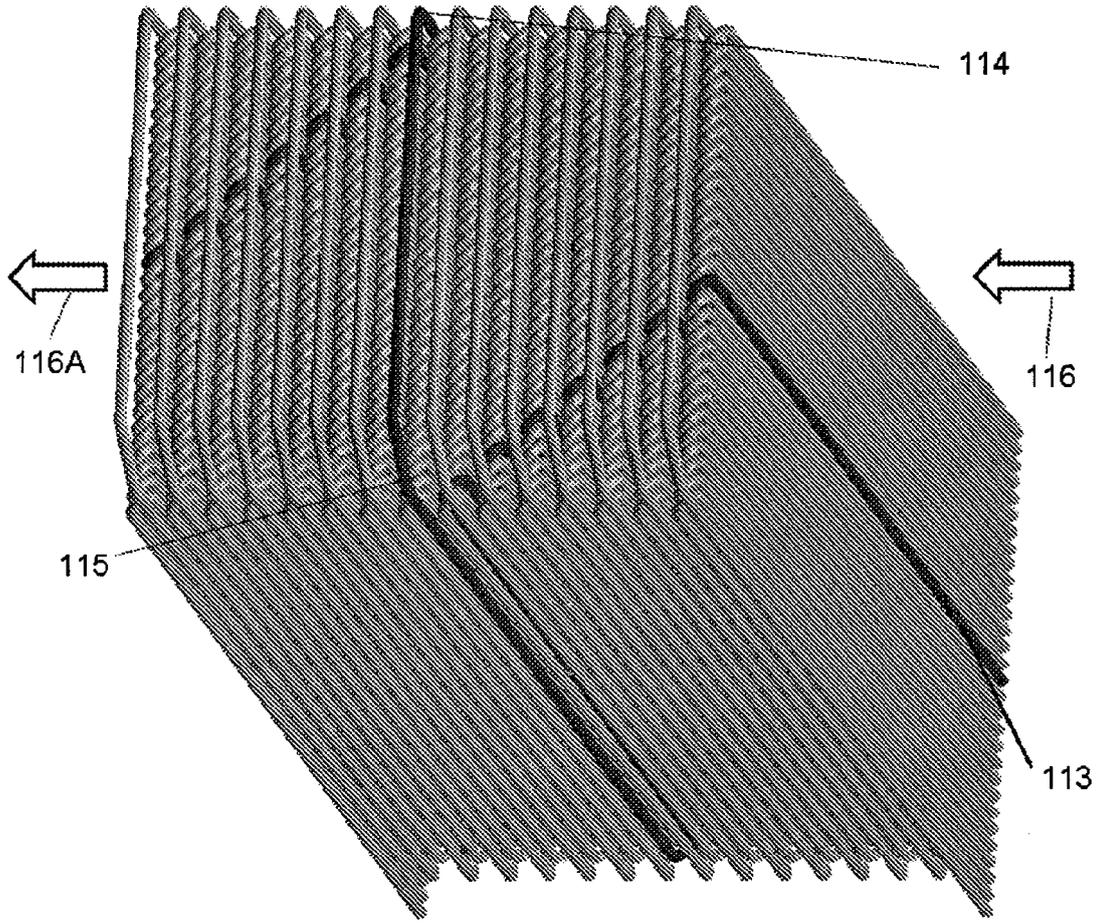


Fig. 11

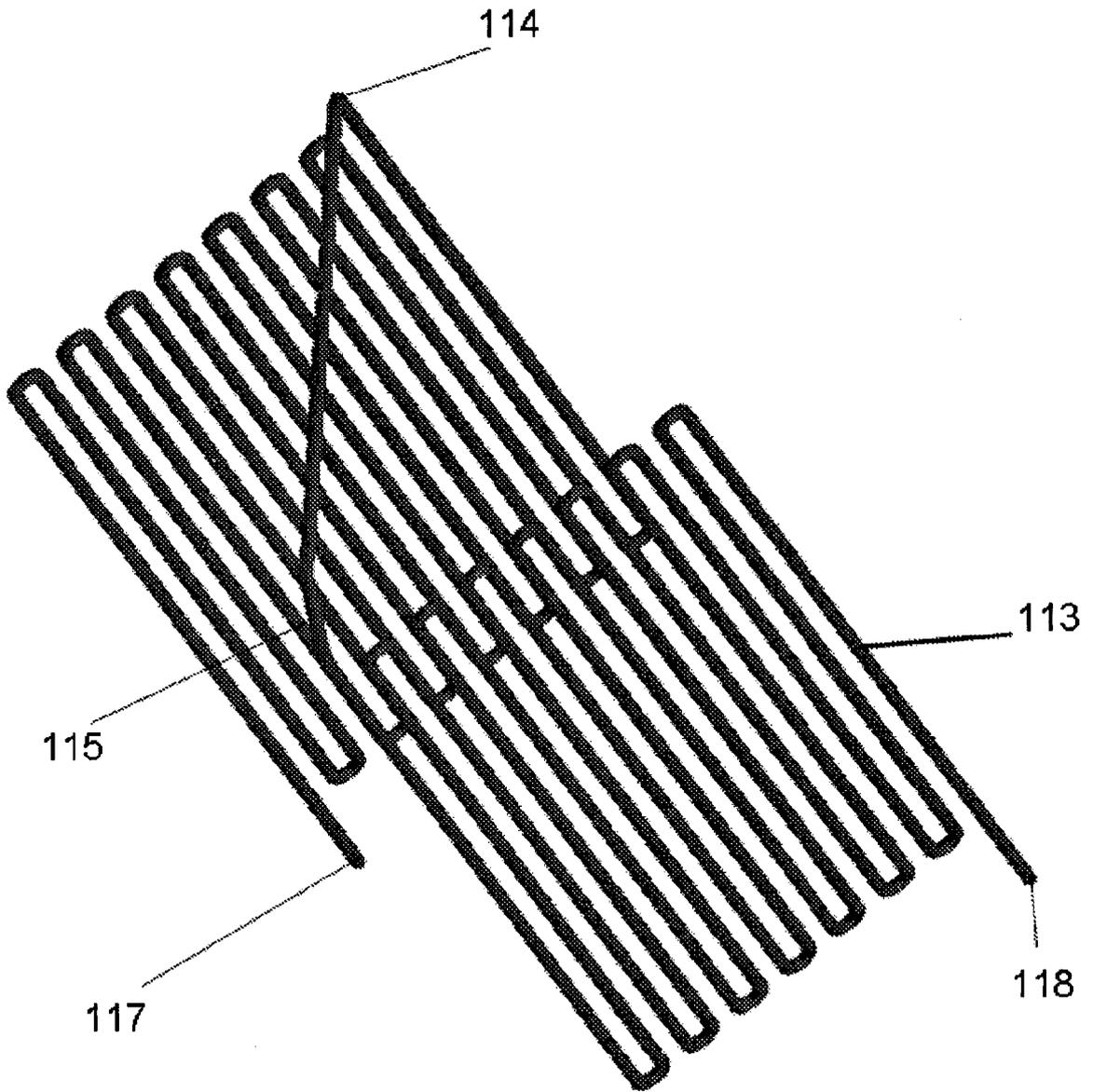


Fig.12

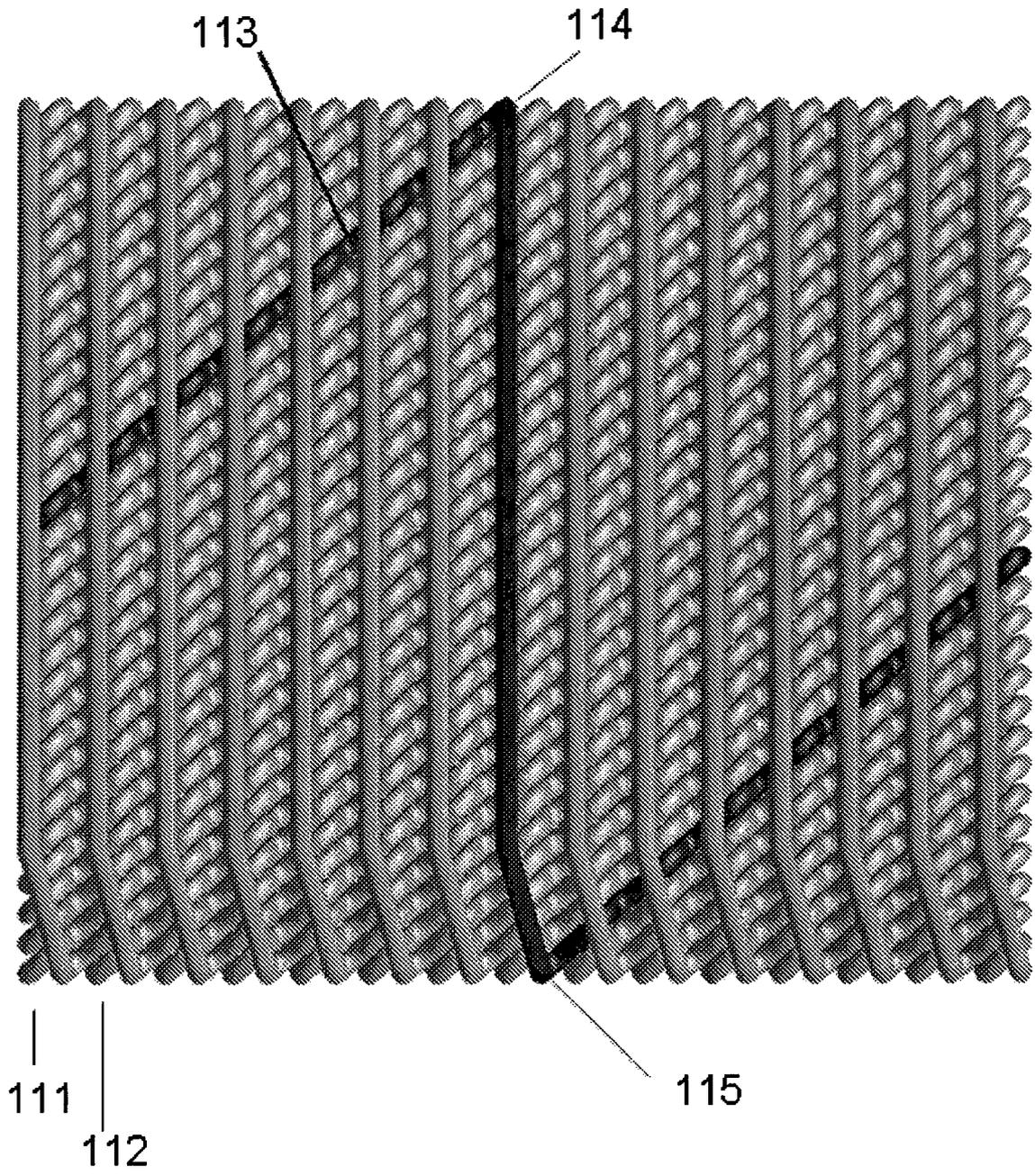


Fig.13

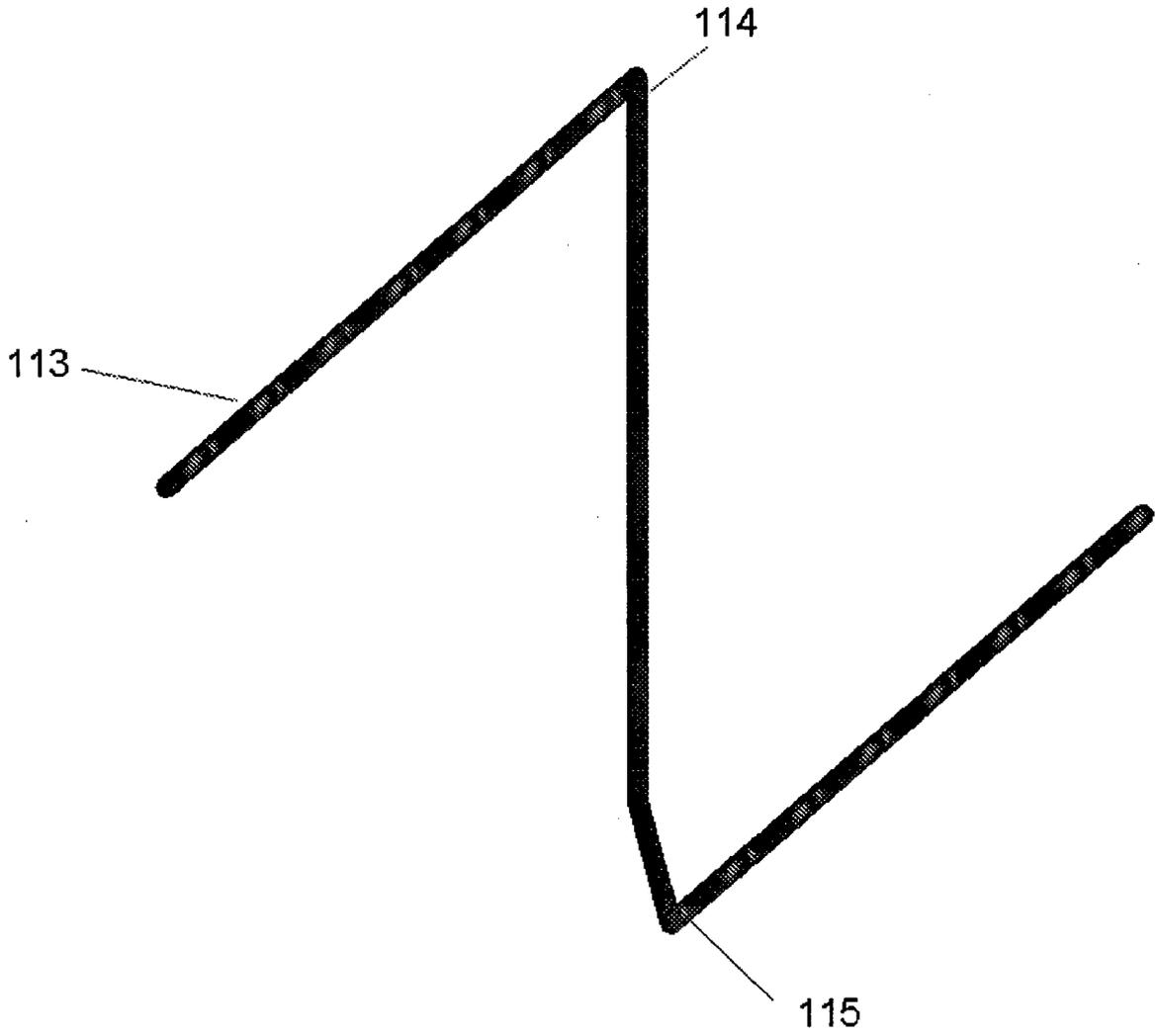


Fig.14

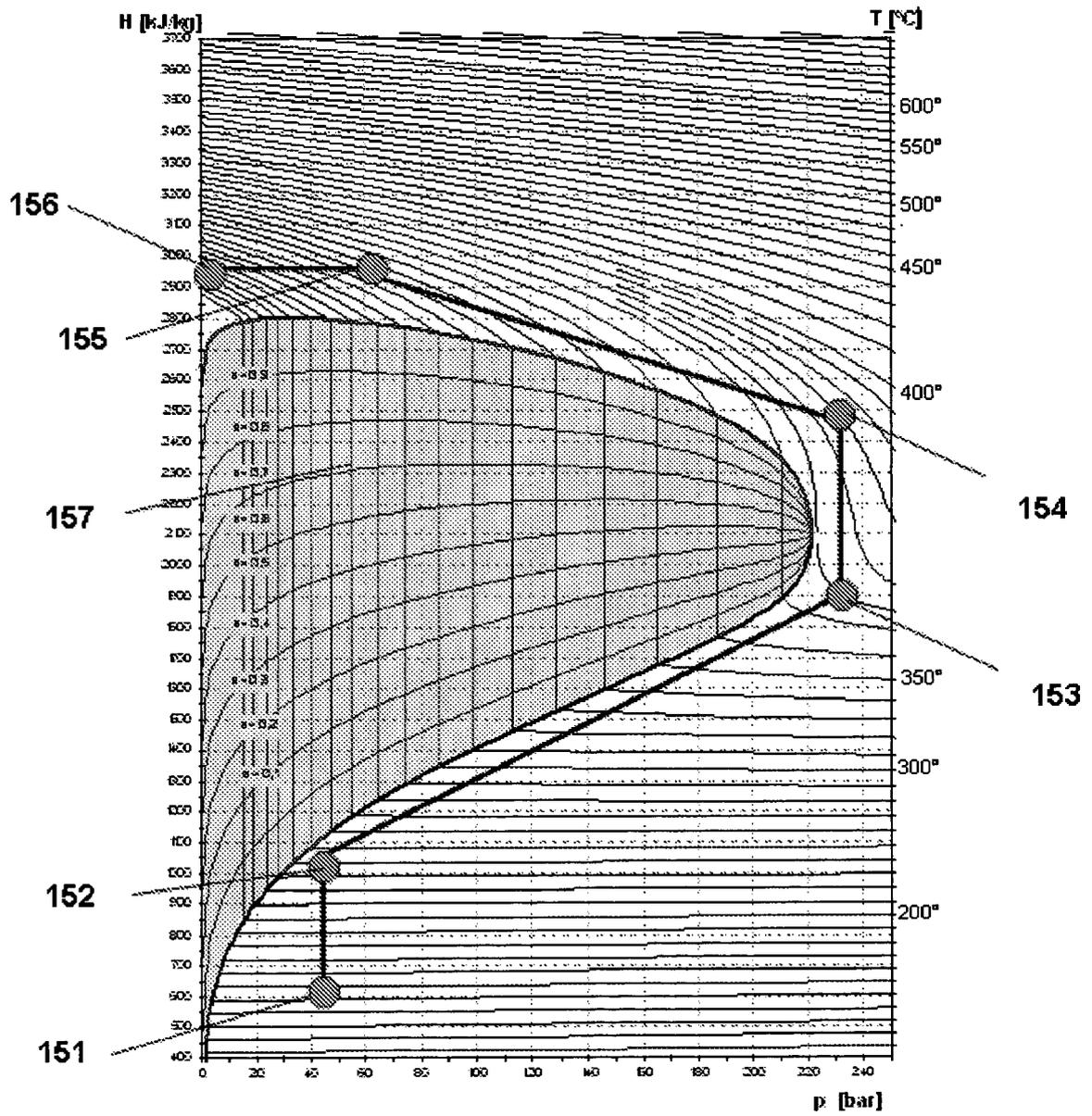


Fig. 15

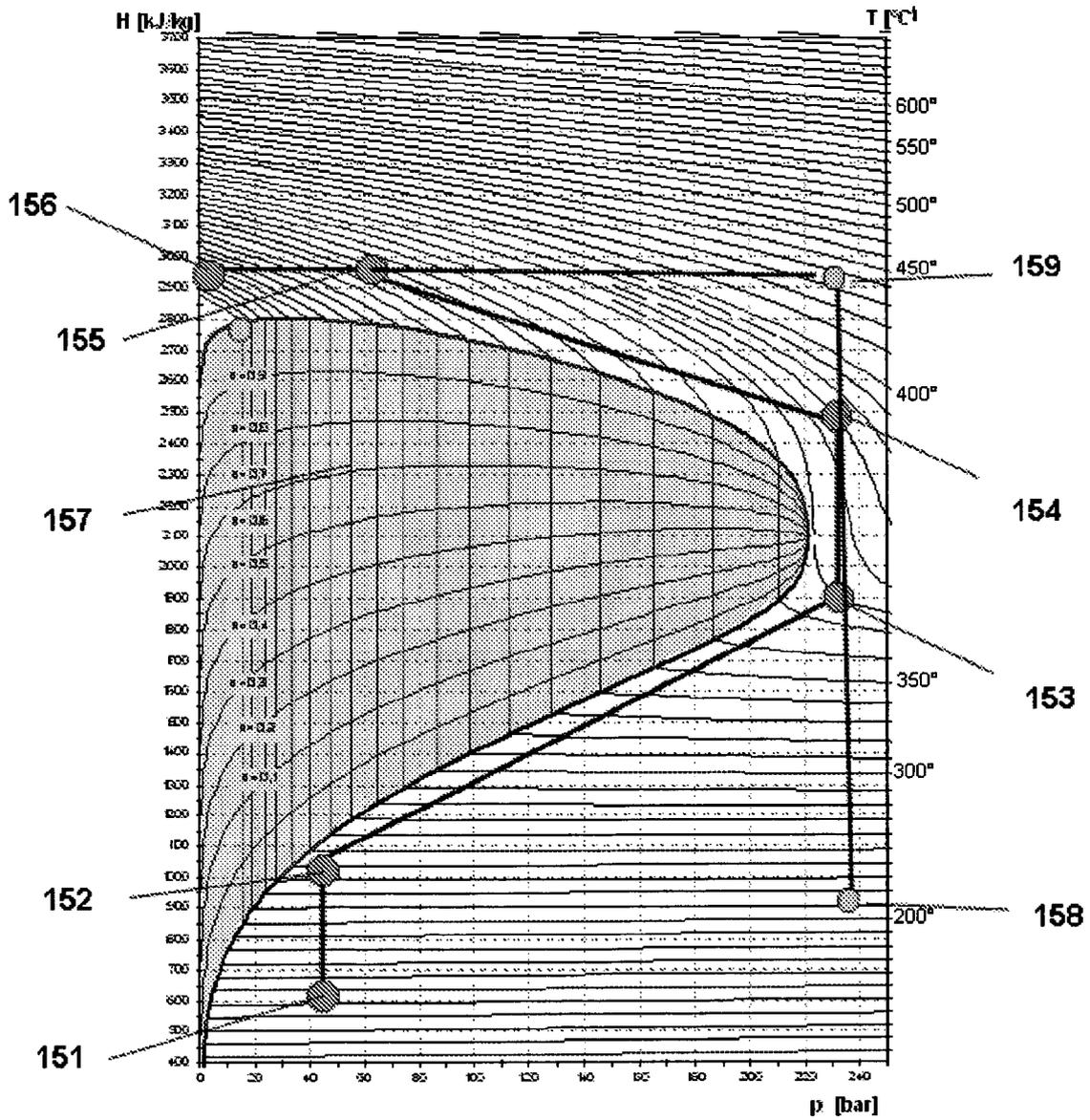


Fig.16