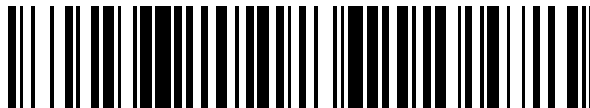


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 628 616**

51 Int. Cl.:

F01K 25/10 (2006.01)

F22B 21/24 (2006.01)

F22B 29/06 (2006.01)

F22B 27/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.01.2012 PCT/IB2012/050385**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.08.2012 WO12110905**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.01.2012 E 12705427 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.03.2017 EP 2676008**

54 Título: **Aparato y proceso para la generación de energía mediante ciclo de Rankine orgánico**

30 Prioridad:

18.02.2011 IT MI20110244

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

03.08.2017

73 Titular/es:

**EXERGY S.P.A. (100.0%)
Via Degli Agresti, 6
40123 Bologna, IT**

72 Inventor/es:

SPADACINI, CLAUDIO

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 628 616 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

Aparato y proceso para la generación de energía mediante ciclo de Rankine orgánico

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un aparato y a un proceso para la generación de energía mediante un ciclo de Rankine orgánico supercrítico.

10 **Antecedentes de la técnica**

Se conocen aparatos basados en un ciclo de Rankine termodinámico que convierten energía térmica en energía mecánica y/o eléctrica de una manera simple y fiable. En este aparato (ORC) se emplean preferentemente fluidos de trabajo del tipo orgánico (de peso molecular alto o medio) en lugar del sistema tradicional de agua/vapor, porque un fluido orgánico es adecuado para la conversión de fuentes de calor a temperaturas relativamente bajas, generalmente entre 100 °C y 300 °C, pero también a temperaturas más altas, de una manera más eficiente. Los sistemas de conversión de ORC han encontrado recientemente aplicaciones cada vez más amplias en diferentes sectores, como en el campo geotérmico, en la recuperación de energía industrial, en aparatos para generación de energía a partir de biomásas y energía solar concentrada (CSP), en regasificadores, etc.

Un aparato de tipo conocido para la conversión de energía térmica por un ciclo de Rankine orgánico (ORC) comprende: al menos un intercambiador de calor que intercambia calor entre una fuente de alta temperatura y un fluido de trabajo, para calentar, evaporar y sobrecalentar el fluido de trabajo; al menos una turbina alimentada por el fluido de trabajo en la fase de vapor que sale del intercambiador de calor para llevar a cabo la conversión de la energía térmica presente en el fluido de trabajo en energía mecánica de acuerdo con un ciclo de Rankine; al menos un generador conectado operativamente a la turbina, en el que la energía mecánica producida por la turbina se convierte en energía eléctrica; al menos un condensador donde el fluido de trabajo que sale de la turbina se condensa y se envía a al menos una bomba; desde la bomba el fluido de trabajo es alimentado al intercambiador de calor.

Se conocen ciclos de ORC y aparatos relacionados en los que la evaporación es subcrítica. Reproducido en las figuras 2a y 2b hay un ciclo de Rankine típico que no forma parte de la invención, obtenido con un fluido orgánico, mediante evaporación subcrítica. El fluido orgánico es bombeado por la bomba desde la presión del punto 1 (succión de la bomba) hasta la presión del punto 2 (suministro de la bomba). Desde el punto 2, el fluido se calienta hasta el punto 3. En el caso más general, el calentamiento contempla el intercambio de calor sensible con el fluido de trabajo en la fase líquida (de 2 a 2'), el intercambio de calor latente entre el líquido saturado y el vapor saturado (2' a 2''), el intercambio sensible al calor con vapor (2'' a 3). Cuando se ha alcanzado el punto 3, el fluido se introduce en la turbina. Las condiciones de salida de la turbina se representan mediante el punto 4. Desde el punto 4, el fluido se enfría hasta el punto 5 y se condensa hasta el punto 1. En un aparato conocido con evaporación subcrítica, el calentamiento del fluido orgánico pasa a través de tres secciones diferentes: precalentamiento, evaporación y sobrecalentamiento (en algunos casos puede faltar el sobrecalentamiento). En estos aparatos conocidos, se utilizan normalmente diferentes intercambiadores de calor para el intercambio de térmico sensible al calor y calor latente. Por lo tanto, el intercambiador de calor de un aparato conocido comprende un precalentador, un evaporador y, opcionalmente, un sobrecalentador. Esto porque normalmente se requiere un gran volumen para el evaporador, ya que generalmente el vapor de un fluido tiene un volumen específico mucho más grande que el líquido. Además, se requieren grandes superficies de intercambio para hacer que el vapor adquiera calor sensible porque los coeficientes de intercambio de calor de vapor son muy bajos.

El documento WO 2011/012516 de la técnica conocida ilustra un generador de vapor que incluye tubos que pasan a través del generador, desde una entrada de agua hasta una salida de vapor sobrecalentada, dispuesta horizontalmente en bancos perpendicularmente atravesados por humos.

El documento US 4 627 386 de la técnica conocida muestra un generador o caldera de vapor en el que la energía térmica utilizada para generar vapor se obtiene desde una turbina de gas.

En el documento JP 60 251388 de la técnica conocida los gases de escape de una turbina de gas se introducen en un intercambiador de calor y el intercambio de calor se realiza en un evaporador. Los tubos de intercambio de calor del evaporador están dispuestos horizontalmente en grupos.

El documento WO 2006/060253 de la técnica conocida describe un método y un aparato que utiliza un ciclo de Rankine orgánico para generar energía en un barco marino. El método comprende las siguientes etapas: proporcionar un dispositivo de ORC que incluye al menos un evaporador, un turbogenerador, un condensador y una bomba de alimentación de enfriador; disponer el evaporador dentro de un conducto de escape de una central eléctrica de un barco marino; ajustar la central eléctrica en operación y bombear selectivamente el enfriador a través del dispositivo de ORC.

5 El documento WO 2011/066089, que es un derecho anterior y no es relevante para la evaluación de la actividad inventiva, divulga un sistema para la generación de energía que utiliza un ciclo de Rankine orgánico. El sistema incluye: un intercambiador de calor configurado para montarse completamente dentro de un conducto, estando configurado el intercambiador de calor para incluir una única entrada que atraviesa desde un lado exterior del conducto hasta un lado interior de un conducto, una única salida que atraviesa desde el lado interior del conducto al lado exterior del conducto, y un conducto que conecta la única entrada a la única salida, proporcionándose el conducto completamente dentro del conducto.

10 El documento DE 696 727 divulga un intercambiador de calor que comprende una pluralidad de tubos encerrados por un tubo exterior común.

15 El documento US 2009/126923 divulga un aparato y métodos para recuperar y usar energía geotérmica. Tales métodos incluyen vaporizar al menos parcialmente un fluido de trabajo haciéndolo pasar a través de un bucle de flujo que se extiende parcialmente dentro de una zona subterránea calentada y empleando el fluido de trabajo vaporizado para alimentar una turbina. Una porción del bucle de flujo puede comprender un pozo de hidrocarburo agotado o parcialmente agotado.

20 El documento US-A-2844360 y la publicación "Double-pipe and multitube heat exchangers with plain and longitudinal finned tubes", Jerry Taborek, Ingeniería de transferencia de calor, 23-10-2007, divulgan intercambiadores de calor de doble tubo del tipo "horquilla".

La publicación "Heat transfer technology", Richard Shilling et al., Revista internacional de ingeniería de hidrocarburos, 01-10-1997, también divulga intercambiadores de calor de horquilla.

25 La publicación "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat", Huijuan Chen et.al, Revisiones de energía renovable y sostenible, Elsevier, Vol.14, Número 9, diciembre de 2010, divulga el uso de ORC supercrítico y propone varios fluidos de trabajo potenciales, sin entrar en detalle sobre el intercambiador de calor usado para calentar el fluido de trabajo.

30 **Divulgación de la invención**

35 Dentro de este alcance, el solicitante ha intentado mejorar las plantas conocidas bajo diferentes puntos de vista, en particular en relación con la optimización del aparato destinado al intercambio térmico, basándose en la naturaleza del fluido orgánico utilizado. Con mayor detalle, el solicitante ha intentado optimizar el aparato que realiza el cambio de estado, de líquido a vapor, del líquido orgánico utilizado.

40 El solicitante ha encontrado que la adopción de un intercambiador de calor del tipo "horquilla" hace que el aparato sea más flexible porque con este intercambiador se realiza una evaporación de una vez que no requiere el subenfriamiento del fluido que entra en el evaporador, que sería necesario en la configuración del precalentador y caldera. Además, este intercambiador hace más flexibles las operaciones de arranque y apagado del aparato, ya que puede permanecer en operación bajo condiciones de funcionamiento en seco, es decir, con el lado primario puesto en marcha y el secundario seco.

45 Más particularmente, la invención se refiere al aparato de ORC de la reivindicación 1.

En otro aspecto, la presente invención se refiere al proceso de ORC de la reivindicación 3.

50 Mediante el término "horquilla" se pretende un intercambiador de calor que comprende más tubos internos insertados en una carcasa exterior en la que los tubos interiores y la carcasa exterior se extienden a lo largo de tramos rectilíneos conectados mutuamente mediante tramos curvilíneos, como una calle con curvas de "horquilla". Un primer fluido fluye en los tubos interiores y un segundo fluido fluye entre los tubos interiores y la carcasa exterior.

55 Este tipo de intercambiador, también denominado "intercambiador de doble tubo", es conocido por sí mismo en la literatura técnica. Por ejemplo, el texto "Process Heat Transfer, Principles and Applications", de Robert W. Sert, publicado en Abril de 2007 por parte de Elsevier Science & Technology Books (ISBN: 0123735882) en las páginas 3/86 y 3/87 describe el intercambiador de horquilla provisto de un tubo interior o un haz de tubos interiores, rodeado por un tubo exterior y en el que el tubo interior y el tubo exterior se extienden como una bobina de tubo formada con al menos dos tramos rectilíneos conectados por un tramo curvo.

60 Utilizando el intercambiador de calor de horquilla dentro del ciclo de ORC, dicho intercambiador de calor es capaz de realizar una conversión de estado de líquido a vapor sobrecalentado mediante un solo aparato, permitiendo reducir los tamaños de toda la planta y los espacios industriales dedicados a la misma.

65 Puesto que el intercambiador de calor de horquilla es además de fabricación fácil, coste limitado y alta fiabilidad, ayuda a hacer toda la planta más barata y más fiable.

El intercambiador de calor de horquilla es capaz de realizar de forma estable los ciclos de precalentamiento, de evaporación de paso único y de sobrecalentamiento, tanto a carga nominal como a cargas parciales y transitorias, para ciclos de ORC supercríticos. Por evaporación "de paso único" se entiende un proceso en el que no se proporciona una distinción física entre el precalentador, el evaporador y el sobrecalentador, pero el fluido continúa sin interrupción desde el estado líquido de partida hasta el estado final de vapor sobrecalentado. Como resultado, la planta puede ser utilizada con diferentes fluidos orgánicos y optimizada en función de la naturaleza de los mismos.

El intercambiador de calor de horquilla que realiza todas las etapas de intercambio antes mencionadas en un solo tubo sin interrupción es, por consiguiente, también autodrenante durante la etapa de desconexión.

Además, el intercambiador del tipo horquilla puede entrar en operación bajo condiciones de funcionamiento en seco. El término "condiciones de funcionamiento en seco" se entiende como que indica las condiciones según las cuales el único lado caliente del intercambiador es alimentado con el fluido. Utilizando el intercambiador de horquilla para realizar una evaporación de paso único, es posible suministrar el aceite diatérmico solo en el lado del faldón y suministrar posteriormente el fluido orgánico en el lado frío.

La configuración del tipo de horquilla tiene además la ventaja de permitir el intercambio de calor con grandes diferencias de temperatura entre la entrada de fluido y la salida de fluido, es decir, con longitudes térmicas elevadas, siendo la tensión mecánica baja. De hecho, usando esta geometría, es posible desacoplar la expansión en la carcasa exterior de la expansión de los tubos.

El intercambiador de calor de horquilla es capaz de soportar altas diferencias de temperatura, incluso más allá de 100-200 °C, entre el fluido de calentamiento entrante (figura 3b, punto A) y el fluido de calentamiento saliente (figura 3b, punto B).

Preferiblemente, el intercambiador de calor de horquilla está con o sin amortiguadores.

El intercambiador de calor de horquilla comprende un haz de tubo interno rodeado por una carcasa.

De acuerdo con el proceso, en la etapa i) el calentamiento del fluido de trabajo orgánico es del tipo supercrítico.

La ventaja de realizar el ciclo que produce una evaporación supercrítica reside en optimizar los rendimientos de conversión desde energía térmica en energía eléctrica. Las condiciones operativas que optimizan las prestaciones del ciclo térmico, tal como la presión de la evaporación, dependen de la naturaleza del fluido. Al cambiar el tipo de fluido orgánico utilizado, también hay un cambio en los parámetros del proceso, lo que optimiza la eficiencia del ciclo y, por consiguiente, en la naturaleza de la evaporación que puede ser subcrítica.

Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas se harán más evidentes a partir de la descripción detallada de una realización preferida pero no exclusiva de un aparato y un proceso para la generación de energía a través del ciclo de Rankine orgánico súper-crítico de acuerdo con la presente invención.

La descripción detallada de estas configuraciones se expondrá a continuación con referencia a los dibujos adjuntos, dados a modo de ejemplo no limitativo, en los que:

- La figura 1 muestra esquemáticamente la configuración de base de un aparato para la generación de energía a través del ciclo de Rankine orgánico según la presente invención;
- Las figuras 2a y 2b muestran respectivamente un ciclo de Rankine orgánico (ORC) con evaporación subcrítica (no parte de la presente invención) y un diagrama T-Q que reproduce las conversiones que se producen en el evaporador;
- Las figuras 3a y 3b muestran respectivamente un ciclo de Rankine orgánico (ORC) con evaporación supercrítica de acuerdo con la presente invención y un diagrama T-Q que reproduce las conversiones que se producen en el evaporador.

Descripción detallada de realizaciones preferidas de la invención

Haciendo referencia a las figuras mencionadas, en general se indica en 10 un aparato para la generación de energía a través del ciclo de Rankine orgánico supercrítico (ORC) de acuerdo con la presente invención.

El aparato 10 comprende un circuito sin fin en el que circula un fluido de trabajo orgánico que tiene un peso molecular alto o medio. Este fluido se puede seleccionar preferiblemente del grupo que comprende hidrocarburos, fluorocarbonos y siloxanos.

La figura 1 muestra el circuito del ciclo de Rankine en su configuración de base y contempla: una bomba 20, un intercambiador de calor 30, una turbina 40 conectada a un generador eléctrico 50, un condensador 60.

La bomba 20 admite el fluido de trabajo orgánico desde el condensador 60 al intercambiador de calor 30. En el intercambiador de calor 30, el fluido se calienta, se evapora y luego se alimenta en fase vapor a la turbina 40, donde se realiza la conversión de la energía térmica presente en el fluido de trabajo en energía mecánica y luego en energía eléctrica, a través del generador 50. Aguas abajo de la turbina 40, en el condensador 60, el fluido de trabajo se condensa y se envía nuevamente al intercambiador de calor a través de la bomba 20.

La bomba 20, la turbina 40, el generador 50 y el condensador 60 no se describirán adicionalmente en el presente documento, ya que son de tipo conocido.

El intercambiador de calor 30 es del tipo "horquilla", es decir, comprende varios tubos interiores (haz de tubos) 70 en los que se produce la circulación del fluido de trabajo orgánico. Los tubos 70 se insertan en una carcasa/faldón/chaqueta exterior 80 y entre los tubos 70 y la carcasa 80 se hace fluir un fluido caliente, aceite diatérmico, por ejemplo. Los tubos interiores 70 y la carcasa exterior 80 se extienden a lo largo de tramos rectilíneos 70b, 80b conectados entre sí mediante tramos curvilíneos 70a, 80a.

En el ejemplo esquemático no limitativo mostrado, el intercambiador de calor de horquilla 30 comprende un haz de tubos interiores 70 en forma de U (representados esquemáticamente) que tiene dos tramos rectilíneos 70b conectados mediante un tramo de conexión curvilíneo 70a. Los tubos interiores 70 se extienden dentro de la carcasa exterior 80, que tomará la misma configuración en forma de U con dos tramos rectilíneos 80b conectados por un tramo de conexión curvilíneo 80a. Un primer extremo 90 (entrada) de los tubos interiores 70 está en conexión de fluido, a través de una tubería adecuada, con la bomba 20. Un segundo extremo 100 (salida) de los tubos interiores 70 está en conexión de fluido, a través de una tubería adecuada, con la turbina 40. En la proximidad del segundo extremo 100 de los tubos interiores 70, la carcasa exterior 80 tiene una entrada 110 para el fluido caliente y, en la proximidad del primer extremo 90 de los tubos interiores 70, la carcasa exterior 80 tiene una salida 120 para dicho fluido caliente. El fluido de trabajo orgánico fluye desde el primer extremo 90 hasta el segundo extremo 100, mientras que el fluido caliente fluye desde la entrada 110 a la salida 120, de manera que el intercambiador de calor 30 mostrado funciona a contracorriente. Según variantes no mostradas, el intercambiador de calor 30 puede tener "n" tramos rectilíneos conectados por "n-1" tramos curvilíneos.

De acuerdo con el proceso de la invención, el fluido de trabajo que se extiende en el intercambiador de calor de horquilla 30 pasa sin interrupción desde el estado líquido inicial hasta el estado final de vapor sobrecalentado. La evaporación tiene lugar en ausencia de contacto entre líquido y vapor y, por lo tanto, bajo la denominada condición de "un solo paso".

Las figuras 2a y 2b describen el intercambio de calor durante el calentamiento del fluido orgánico en el caso más general de calentamiento subcrítico que no forma parte de la invención. Durante el intercambio térmico, el fluido caliente (aceite diatérmico, por ejemplo) que entra en el punto A se enfría por transferencia de calor Q hasta que alcanza las condiciones del punto B. El fluido orgánico que sale de la bomba 20 en las condiciones descritas desde el punto 2 absorbe calor Q y se calienta. El perfil térmico seguido por el fluido durante el calentamiento se reproduce por la curva 2'-2"-3 en la figura 2a, que no forma parte de la invención.

Reproducido en las figuras 3a y 3b hay un ciclo de Rankine orgánico, ORC, con evaporación supercrítica de acuerdo con la invención. A diferencia de la evaporación descrita en la figura 2a, el fluido es bombeado mediante la bomba hasta una presión más alta que la crítica. Al calentarse desde este punto hasta el punto 3, no es posible identificar los puntos 2' y 2" que caracterizan la transición de fase. En particular, el volumen de fluido específico cambia continuamente, sin discontinuidad de líquido a vapor. Esto es cierto a la presión nominal, pero debe señalarse que durante los transitorios de arranque y apagado, el cruce de la región subcrítica es inevitable.

En los ciclos de ORC supercríticos, el calentamiento tiene lugar sin cambios de fase, sin embargo, en los transitorios de arranque y apagado y durante los transitorios de presurización/despresurización consiguientes, se atraviesa la curva de saturación y, por lo tanto, se presta cuidado y atención particular a sistemas adaptados para evitar la formación de bolsas de líquido en áreas donde existe la presencia de vapor sobrecalentado.

La conversión del estado de líquido en vapor en el único intercambiador de horquilla es capaz de intercambiar el calor sensible necesario para llevar el fluido a condiciones de líquido saturado (precalentamiento, PH, figura 2a, tramo 2'-2'), y el calor latente para llevar el líquido saturado a las condiciones de vapor saturado (evaporación, EV, figura 2a, tramo 2'-2"), así como el calor sensible necesario para el sobrecalentamiento del vapor (sobrecalentamiento, SH, figura 2a, tramo 2"-3). La energía térmica intercambiada en el aparato con el intercambiador de horquilla de acuerdo con la invención permite al fluido realizar conversiones que implican intercambio de calor en condiciones supercríticas (véase la figura 3a).

REIVINDICACIONES

1. Un aparato de ORC para la generación de energía mediante un ciclo de Rankine orgánico supercrítico, que comprende:

- 5
- un único intercambiador de calor (30) para intercambiar calor entre una fuente de calor y un fluido de trabajo orgánico, para calentar y evaporar y sobrecalentar dicho fluido de trabajo;
 - al menos una turbina (40) alimentada con el fluido de trabajo vaporizado que sale del intercambiador de calor (30), para hacer una conversión de la energía térmica presente en el fluido de trabajo en energía mecánica según un ciclo de Rankine;
 - al menos un condensador (60) en el que el fluido de trabajo que sale de dicha al menos una turbina (40) se condensa y se envía a al menos una bomba; siendo alimentado entonces el fluido de trabajo a dicho intercambiador de calor (30);

15 **caracterizado por que** el intercambiador de calor (30) es de tipo horquilla y comprende un haz de tubos interiores (70) rodeados por una carcasa exterior (80); en donde el haz de tubos interiores (70) y la carcasa exterior (80) se extienden a lo largo de al menos dos tramos rectilíneos (70b, 80b) conectados entre sí por al menos un tramo curvilíneo (70a, 80a); en donde la circulación del fluido de trabajo orgánico se produce en el haz de tubos interiores (70) y se hace fluir un fluido caliente entre el haz de tubos interiores (70) y la carcasa (80); en donde el intercambiador de calor de horquilla (30) es de tipo contracorriente.

2. Un aparato según la reivindicación 1, que comprende además al menos un generador (50) conectado operativamente a dicha al menos una turbina (40), en donde la energía mecánica producida por la turbina (40) se convierte en energía eléctrica.

3. Un proceso de ORC para la generación de energía mediante un ciclo de Rankine orgánico supercrítico, que comprende:

- 30
- i) alimentar un fluido de trabajo orgánico a través de un único intercambiador de calor (30) para intercambiar calor entre una fuente de calor y dicho fluido de trabajo, para calentar y evaporar dicho fluido de trabajo;
 - ii) alimentar el fluido de trabajo orgánico vaporizado que sale del intercambiador de calor (30) a al menos una turbina (40) para hacer una conversión de la energía térmica presente en el fluido de trabajo en energía mecánica de acuerdo con un ciclo de Rankine;
 - iii) alimentar el fluido de trabajo orgánico que sale de dicha al menos una turbina (40) a al menos un condensador (60), donde el fluido de trabajo es condensado;
 - iv) enviar el fluido de trabajo orgánico que sale del condensador (60) a dicho intercambiador de calor (30);
- 35 **caracterizado por que** la etapa i) comprende: hacer fluir el fluido orgánico de trabajo a través de un intercambiador de calor (30) de tipo horquilla que comprende un haz de tubos interiores (70) rodeado por una carcasa exterior (80); en donde el haz de tubos interiores (70) y la carcasa exterior (80) se extienden a lo largo de al menos dos tramos rectilíneos (70b, 80b) conectados entre sí por al menos un tramo curvilíneo (70a, 80a); en donde la circulación del fluido de trabajo orgánico se produce en el haz de tubos interiores (70) y se hace fluir un fluido caliente entre el haz de tubos interiores (70) y la carcasa (80); en donde el intercambiador de calor de horquilla (30) es de tipo contracorriente; en donde en la etapa i) el calentamiento del fluido de trabajo orgánico es del tipo supercrítico.

4. Un proceso según la reivindicación 3, en el que el fluido de trabajo orgánico se selecciona del grupo que comprende: hidrocarburos, fluorocarbonos y siloxanos.

5. Un proceso según la reivindicación 3, en el que el intercambiador de calor (30) del tipo horquilla entra en funcionamiento en condiciones de marcha en seco.

FIG 1

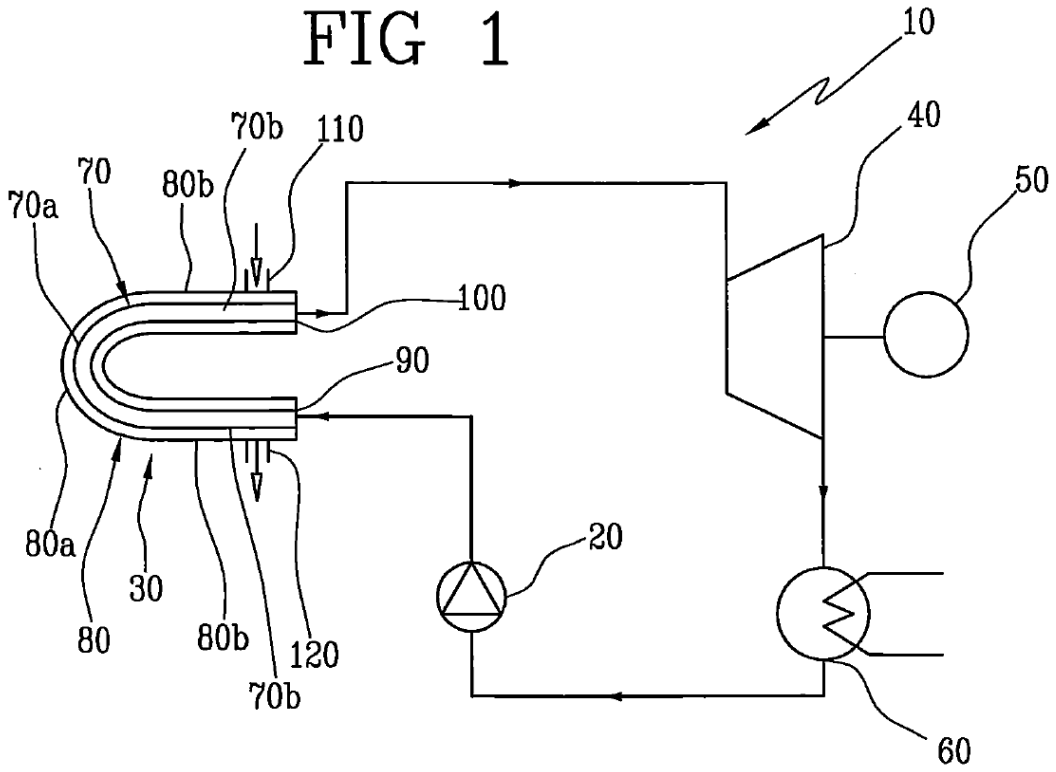


FIG 2a

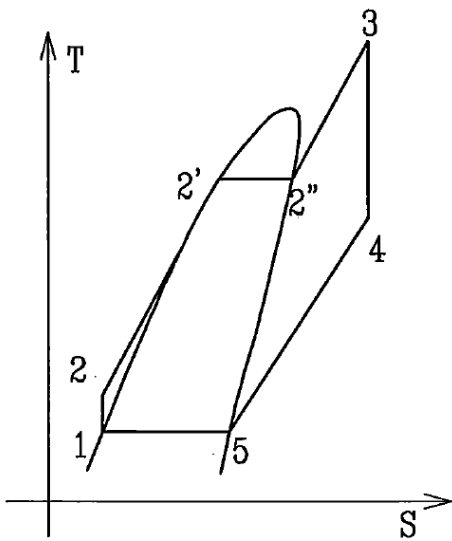


FIG 2b

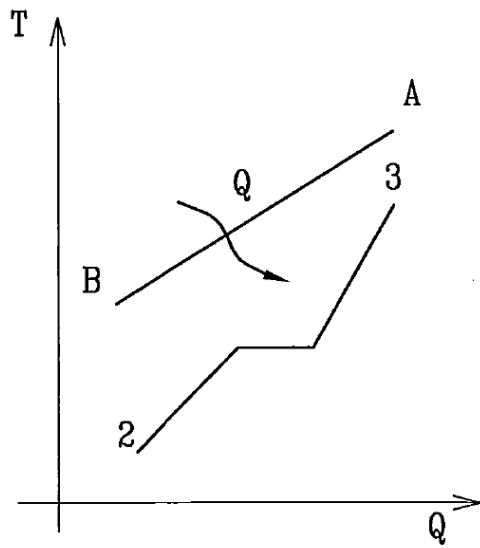


FIG 3a

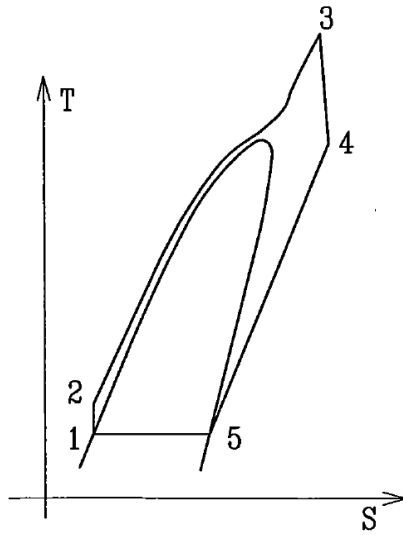


FIG 3b

