

Un dispositivo compresor gravitacional de vapor

Objeto

La presente invención se refiere a un dispositivo compresor de vapor de agua por agua líquida en caída vertical a velocidad terminal, que utiliza el campo gravitacional terrestre como dosificador de la potencia mecánica entregada, creando un régimen óptimo de velocidades relativas bajas y uniformes que aminora las disipaciones de energía y maximiza la transferencia de energía y, por consiguiente, la eficiencia del proceso de compresión de vapor.

10 Estado de la técnica

Actualmente los sistemas de compresión de vapor de agua se clasifican en tres grupos según el agente compresor: compresión térmica de vapor, compresión mecánica de vapor y compresión de vapor por energía cinética de agua líquida. Estos compresores de vapor de agua se usan en instalaciones de desalinización o purificación de agua.

La compresión térmica de vapor aumenta la temperatura y presión de un flujo de vapor mediante un eyector al que se aporta un vapor motriz de mayor temperatura y presión. Son sistemas de compresión de vapor cuyo uso queda condicionado a la disponibilidad de vapor residual para su uso como vapor motriz del eyector. Son dispositivos con consumos específicos de energía elevados y que en su aplicación industrial a procesos de desalinización multiefecto MED dan como resultado consumos específicos de energía agregados de energía térmica y eléctrica superiores a $6 \text{ kWh}_e/\text{m}^3$ para desalinizar agua de mar de 35.000 ppm sólidos disueltos totales.

La compresión mecánica de vapor de agua consiste en aumentar la presión de un flujo de vapor al transitar por un compresor mecánico. Son sistemas cuya capacidad queda limitada por el volumen de la cámara de compresión del compresor y presentan problemas de supercalentamiento del vapor por encima de la curva de equilibrio presión-temperatura del vapor saturado. Son dispositivos con consumos específicos de energía elevados y que en su aplicación industrial a procesos de desalinización multiefecto dan como

resultado consumos específicos de energía eléctrica superiores a 6 kWh/m³ para desalinizar agua de mar de 35.000 ppm sólidos disueltos totales.

- La compresión de vapor por aporte de energía cinética en forma de velocidad de gotas finas de agua líquida consiste en la actualidad en aportar energía a un flujo de vapor de agua saturado a través de un flujo de gotas de agua líquida a alta velocidad relativa respecto al flujo de vapor. Es la tecnología denominada HID por sus siglas en inglés, de desalinización por inyección hidráulica, que consiste en transformar la energía potencial de agua bajo presión, aportada por una bomba de presión, en energía cinética de gotas a alta velocidad que se transforma a su vez seguidamente en energía potencial de un flujo de vapor de agua comprimido por las fuerzas de arrastre de las gotas de agua líquida frenadas por el medio gaseoso vapor de agua. El sistema de compresión de vapor HID tiene una eficiencia energética superior a los otros sistemas de compresión de vapor actuales, pero presenta limitaciones por pérdida de carga de las boquillas, por baja eficiencia energética en el proceso de formación de gotas a alta velocidad debidas al diseño de las boquillas actuales y por las disipaciones de energía que se producen a altas velocidades relativas de gotas de agua líquida en un medio de vapor de agua saturado. Son dispositivos con consumos específicos de energía reducidos y que en su aplicación industrial a procesos de desalinización dan como resultado consumos específicos de energía en torno a 3 kWh/m³ para desalinizar agua de mar de 35.000 ppm sólidos disueltos totales, utilizando las actuales boquillas generadoras de gotas disponibles en el mercado.
- La compresión de vapor por aporte de agua líquida no debe confundirse con viejos sistemas de desalinización que usan chorros de gota de agua fría como punto de condensación del vapor de agua, en los que las gotas de agua líquida no actúan como agente de compresión del vapor si no como superficie condensadora que absorbe el calor latente de condensación del vapor de agua y que son sistemas de condensación muy ineficientes dado que no reciclan el calor latente de condensación.

Es conocido que la interacción de las fuerzas de cohesión y adhesión de las moléculas de agua con la superficie sólida de un recipiente producen una

curvatura de la interfaz líquido vapor conocida como menisco de agua o de solución acuosa.

Asimismo, es conocido que un menisco de agua se divide en tres regiones caracterizadas por tener comportamientos muy diferentes respecto a la transmisión de calor a través de la película líquida y la fuerza de adhesión interfacial sólido-líquido. Estas tres regiones son la región de adsorción, la región de transición y la región masiva del menisco. Es conocido que el espesor de la película de agua líquida es más pequeño en la región de adsorción, pero la película líquida delgada se mantiene fuertemente adherida al sustrato sólido por las fuerzas intermoleculares entre el líquido y el sólido. En esta región de adsorción, la resistencia térmica a conducción es pequeña y la resistencia térmica interfacial es grande. En la región masiva del menisco, debido al gran espesor de la película de agua, la resistencia térmica por conducción es grande y la resistencia térmica interfacial es pequeña. La región de transición se encuentra entre la región de adsorción y la región masiva del menisco. Esta región de transición se caracteriza por una baja resistencia térmica por conducción resultante del reducido espesor de la capa de agua y por una baja resistencia térmica interfacial.

Una divulgación de referencia en esta materia es el artículo "Revisión de los efectos de la topografía superficial, la química superficial y la física de fluidos sobre la evaporación en la línea de contacto", Review of the Effects of Surface Topography, Surface Chemistry, and Fluid Physics on Evaporation at the Contact Line, del que es primer autor Joel L. Plawsky, del Rensselaer Polytechnic Institute de Nueva York.

Es conocido que en el agua o la solución acuosa que está en contacto con las paredes sólidas de un recipiente se produce una curvatura de la interfaz líquido-gas por efecto de la resultante de las fuerzas de adhesión y de cohesión. Es conocido que, si las paredes son próximas entre sí, la interfaz líquido vapor está curvada en toda su amplitud entre pared y pared. Es conocido que, si las paredes del recipiente están a una distancia superior a la de actuación de las fuerzas de adhesión de las moléculas de agua sobre las paredes, entonces la interfaz líquido gas es plana en la zona central entre paredes y sólo se curva en la proximidad de las paredes.

Sumario

La presente invención se define en el apartado de Reivindicaciones.

Un dispositivo compresor de vapor de agua por arrastre de agua líquida en caída vertical a velocidad terminal sometida a fuerzas gravitacionales que denominamos GVC, por sus siglas en inglés de compresor o compresión
5 gravitacional de vapor presenta una capacidad para comprimir vapor de agua con una eficiencia superior a los actuales sistemas y dispositivos de compresión de vapor

El dispositivo de compresión gravitacional de vapor GVC utiliza las fuerzas de arrastre de gota líquida sometida a la fuerza de la gravedad en movimiento
10 relativo respecto a un medio gaseoso de vapor de agua para aumentar la presión del mismo vapor.

El dispositivo de compresión gravitacional de vapor GVC tiene una altura total h que se divide en dos zonas: una zona inicial de ajuste de velocidad con una altura h_1 en la que la velocidad de la gota líquida se ajusta desde su velocidad
15 inicial de salida de la boquilla hasta llegar a una velocidad relativa respecto al flujo de vapor próxima o igual a su velocidad terminal correspondiente al tamaño de la gota y una zona con una altura h_2 en la que la velocidad de la gota líquida se mantiene, debido a la gravedad, a una velocidad relativa respecto a la velocidad del flujo de vapor próxima o igual a la velocidad
20 terminal, de caída libre en el ambiente de vapor de agua, que corresponde a su tamaño y a la densidad y viscosidad del vapor de agua atravesado.

A lo largo de la altura h_1 del compresor gravitacional de vapor GVC la energía cinética de la gota varía, con un efecto positivo sobre la compresión del vapor si la velocidad de salida de la gota es superior a la suma de la velocidad del
25 flujo de vapor más la velocidad terminal de caída de la gota y tiene un efecto negativo en la compresión del vapor si la velocidad de salida de la gota es inferior a la suma de la velocidad del flujo de vapor más la velocidad terminal de caída de la gota.

A lo largo de la altura $h_1 + h_2$ el compresor gravitacional de vapor GVC transfiere energía potencial gravitacional desde la gota mediante la fuerza de
30 arrastre de la gota a lo largo de la altura $h_1 + h_2$, pero a lo largo de h_2 la velocidad relativa de la gota con relación al vapor es igual o próxima a la velocidad terminal de caída de la gota en el vapor de forma que en este tramo

se produce el menor nivel posible de disipación de energía. El compresor gravitacional de vapor GVC es el único sistema y dispositivo de compresión de vapor que utiliza energía potencial gravitacional de gotas de agua a velocidad relativa terminal y constante, reduciendo los fenómenos de disipación de energía que se producen en el caso de velocidades relativas superiores a la velocidad terminal, como sucede en la actual compresión de vapor HID y que limita la eficiencia energética de los actuales compresores de vapor HID.

El dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC es un compresor de vapor por agua líquida formado por una cámara de compresión vertical, en la parte superior de la cámara de compresión se aporta el vapor de agua a comprimir y la parte superior de la cámara de compresión dispone de una serie de boquillas de agua líquida que forman al menos un haz de gotas finas. El dispositivo compresor funciona con baja velocidad relativa de las gotas respecto al flujo de vapor, de modo que se limitan los fenómenos de disipación de energía por alta velocidad relativa entre la gota y el medio gaseoso en la parte superior h_1 y el régimen de las gotas a velocidad terminal en el flujo de vapor es laminar o de baja disipación de energía a lo largo de la mayor porción de la altura de la cámara h_2 .

Dentro de la parte superior de la cámara de compresión, la interacción entre el flujo de gotas y el flujo de vapor ocurre con unas velocidades relativas distintas a la velocidad terminal de caída entre las gotas y el vapor de agua, lo que conlleva unos fenómenos de disipación de energía menores, dada la baja velocidad relativa, a lo largo de una altura h_1 , hasta que las gotas llegan a la velocidad terminal de caída en el vapor de agua de forma que la fuerza resultante entre gravedad y flotabilidad es igual a la fuerza de arrastre con el medio gaseoso de vapor de agua y la gota pasa a caer a velocidad relativa constante en relación al gas, a velocidad terminal, de forma que las gotas transmiten al vapor fuerzas que se transforman en mayor presión del vapor de agua, comprimiéndolo con una elevada eficiencia energética.

A diferencia de los actuales sistemas de compresión mediante inyección de agua líquida HID, un compresor gravitacional de vapor GVC realiza, dentro de la cámara de compresión, una transformación eficiente de la energía potencial de la gota líquida en energía potencial de compresión del vapor de

agua, manteniéndolo en estado saturado, gracias a la aplicación de las fuerzas de gravedad, la transferencia de energía se realiza en condiciones más eficientes, con mínimas velocidades relativas y mínima disipación de energía.

- 5 El dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC requiere el aporte de energía potencial mediante una bomba de agua líquida en forma de baja presión del agua que se transforma en elevación del agua en altura, rotura de la tensión superficial para formar gotas y en la energía cinética inicial de las gotas. Para conseguir gotas entre 100 y 300 micras actualmente se usan
10 boquillas disponibles en el mercado que funcionan con presiones entre 1,5 y 3 bares y con velocidades de salida de la gota de la boquilla entre 10 y 20m/s.

- En el diseño de un dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC se determina la velocidad del flujo de vapor según el diámetro de la sección transversal de la cámara de compresión; se determina el diámetro de la gota
15 según el tipo de boquillas utilizadas y la presión a la que se aporta el agua líquida a la boquilla y el diámetro de la gota determinará la velocidad terminal y, en consecuencia, el tiempo de caída de la gota y la masa total de gotas de agua cayendo a velocidad terminal por unidad de tiempo; se determina la diferencia entre la velocidad de salida de la gota líquida y la velocidad del
20 flujo de vapor de agua y esta diferencia de velocidades causará la altura h_1 hasta ajustarse a un flujo de gotas a velocidad terminal dentro del flujo de vapor; se decide la altura h_2 de caída a velocidad terminal a lo largo de la cual se obtendrá una eficiente transformación de energía potencial del agua líquida en mayor energía potencial del vapor en forma de mayor presión. La
25 combinación de estos parámetros en el diseño de un dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC acoplado a un intercambiador de calor latente de alta densidad de regiones de transición, permite la construcción de dispositivos de desalinización por compresión gravitacional de vapor GVCD, por sus siglas en inglés, con rendimientos energéticos agregados superiores
30 o iguales al 60%, lo cual permite desalinizar agua de mar con una salinidad de 45.000 ppm por debajo de 1,7kWh/m³, cuando el actual récord para salinidad de 40.000ppm es de 2,23kWh/m³ usando dispositivos de osmosis inversa.

Un intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición comprende tubos o cámaras intercambiadores de calor en los que el agua condensada sobre la cara condensadora y la solución acuosa a evaporar sobre la cara evaporadora fluyen dentro de canales cuyas paredes se encuentran en proximidad inferior o igual a 1mm, de forma que el flujo de agua o de solución acuosa dentro de estos canales tiene la interfaz líquido-gas curvada en toda la amplitud de pared a pared lo que consigue una alta densidad de regiones de transición en la superficie de la cara evaporadora y de la cara condensadora.

En una realización del intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición comprende tubos o cámaras evaporadores-condensadores con un perfil de la pared de tubo que en su corte perpendicular al flujo de líquido tiene un perfil sinusoide, en diente de sierra o similar de forma que toda la interfaz líquido gas del agua o la solución acuosa que fluye dentro de microcanales en los que las fuerzas de adhesión del agua sobre la pared lateral del microcanal curva su interfaz líquido gas. Las medidas de los microcanales de la cara evaporadora y de la cara condensadora dependerán de las fuerzas de adhesión y cohesión y ello a su vez depende de las propiedades de la solución salina, de las propiedades del material de la pared de tubo o cámara evaporador condensador, del ángulo de inclinación de las paredes del microcanal y de otros muchos factores como del acabado o tratamiento aplicado a las paredes del tubo o cámara evaporador-condensador con propiedades hidrófilas o hidrófugas.

En una realización las caras de una pared de un tubo o cámara evaporador-condensador de un intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición se realizan con aleaciones marinas de aluminio, con un perfil de canales simétricamente alternantes, en diente de sierra o zig-zag que forma unos microcanales tanto en la cara evaporadora como en la cara condensadora de una profundidad inferior o igual a 1 mm y una distancia entre cumbres o vértices del microcanal inferior o igual a 1 mm.

Para conseguir un ciclo de evaporación y condensación, el intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición funciona con un salto térmico o diferencia de temperatura entre la solución acuosa a evaporar en la cara evaporadora del tubo o cámara evaporador-condensador y la temperatura

del vapor de agua secundario a condensar en la cara condensadora del tubo o cámara evaporador-condensador inferior o igual a $0,3^{\circ}\text{C}$ más la elevación del punto de ebullición correspondiente a la salinidad y temperatura de la solución acuosa a evaporar.

- 5 Esta diferencia de temperatura de $0,3^{\circ}\text{C}$ más la elevación del punto de ebullición para agua marina resulta en una diferencia de temperatura inferior a 1°C en comparación con los 3°C que se suelen requerir en los actuales dispositivos desalinizadores por compresión de vapor o de compresión mecánica de vapor. El resultado conseguido con el intercambiador de calor
- 10 de alta densidad de regiones de transición es un bajo diferencial de temperatura entre la solución acuosa a evaporar y el agua dulce condensada y ello se debe a una estructura de la pared del tubo o cámara evaporador condensador en la que las fuerzas de cohesión y de adhesión de las moléculas de agua posicionan el flujo de la solución acuosa a evaporar de la cara
- 15 evaporadora del tubo o cámara evaporador-condensador y posicionan el flujo de agua condensada en la cara condensadora del tubo o cámara evaporador condensador de forma que la interfaz líquido gas está curvada en toda la amplitud del flujo entre las paredes de cada microcanal y se consigue una alta densidad de regiones de transición en la cara evaporadora y en la cara
- 20 condensadora.

- El resultado de posicionar los flujos de líquido entre paredes de microcanales de forma que las fuerzas de adhesión y cohesión mantengan la curvatura de la interfaz líquido gas en toda la amplitud del microcanal es el de conseguir una alta densidad de superficie de agua en región de transición tanto en la
- 25 cara evaporadora como en la cara condensadora. Para lograr una elevada densidad de regiones de transición simultáneamente tanto en la cara evaporadora como en la cara condensadora, la pared del, al menos un tubo o cámara evaporador condensador del intercambiador de calor latente, debe tener el perfil de la sección normal tanto al flujo de solución salina a evaporar
- 30 como a la del flujo de condesado, en forma simétricamente alternante en la que el menisco evaporador de la cara evaporadora queda alternativamente invertido con relación al menisco condensador de la cara condensadora y así sucesivamente a lo largo del perímetro del tubo o cámara evaporador-

condensador, de manera que, las regiones de transición de los meniscos evaporadores y de los meniscos condensadores queden en proximidad.

Breve descripción de las figuras

Una explicación más detallada de la invención se da en la descripción que sigue y que se basa en las figuras adjuntas:

La Figura 1 muestra en un esquema en un corte transversal un compresor gravitacional de vapor GVC,

La Figura 2 muestra en un esquema en un corte transversal un compresor gravitacional de vapor GVC acoplado a un intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición,

La Figura 3 muestra en un esquema en un corte longitudinal las tres regiones de un menisco evaporador en proximidad de las tres regiones de un menisco condensador y se destacan las propiedades del flujo de calor desde una región de transición condensadora a una región de transición evaporadora, situadas en proximidad,

La Figura 4 muestra en un esquema en un corte longitudinal las tres regiones de un menisco evaporador en proximidad de las tres regiones de un menisco condensador y se destacan las propiedades del flujo de calor desde una región de transición condensadora y desde una zona libre de agua de la cara condensadora a una región de transición evaporadora, situadas en proximidad, y

La Figura 5 muestra en un esquema en un corte transversal, perpendicular al flujo de solución acuosa de la cara evaporadora y al flujo de agua condensada de la cara condensadora, de una sección de la pared de un tubo o cámara evaporador-condensador de un intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición, con un diseño de la pared del tubo o de la cámara evaporador-condensador en forma alternante o capiculado, en forma de eje con codos en lados enfrentados, donde un menisco evaporador queda rotado unos 180°, en simetría inversa con relación a cada uno de los dos meniscos condensadores adyacentes del lado de enfrente y la proximidad de las paredes de los microcanales de la cara evaporadora y de la cara condensadora consigue la curvatura de la interfaz líquido gas, en toda la amplitud del microcanal de pared a pared, del flujo de agua de la cara

condensadora y del flujo de solución acuosa de la pared evaporadora consiguiendo una alta densidad de regiones de transición en la superficie de la cara evaporadora y de la cara condensadora y consiguiendo una alta densidad de zonas de alto flujo de calor desde la cara evaporadora a la cara condensadora que resultan en un elevado coeficiente de transferencia de calor latente del intercambiador de calor latente, por unidad de superficie y grado Kelvin de diferencia de temperatura.

Descripción detallada

En relación ahora con las figuras 1 a 5, un dispositivo compresor gravitacional de vapor de agua denominado GVC, por sus siglas en inglés, comprende una cámara vertical con un primer tramo h_1 de ajuste de velocidad para flujos de gotas de agua con una velocidad relativa respecto al flujo de vapor distinta a la velocidad terminal de caída de gota y un segundo tramo h_2 de la cámara de compresión dedicado a un flujo de gotas a velocidad relativa igual o similar a la velocidad terminal de caída de la gota en el flujo de vapor. El dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC comprende también unas boquillas en la parte superior de la cámara de compresión que aportan gotas finas inferiores a 300 micras y a una baja velocidad relativa de la gota respecto al flujo de vapor de agua.

El dispositivo compresor GVC si funcionara con gotas superiores o iguales a 300 micras perdería eficiencia energética dado que la altura de la cámara de compresión debe ser superior dada la mayor velocidad terminal de las gotas a medida que aumenta su diámetro.

En el diseño del dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC se determina la velocidad del flujo de vapor según el diámetro interior de la cámara de compresión; se determina el diámetro de la gota según el tipo de boquillas utilizadas y la presión a la que se aporta el agua líquida a la boquilla; se determina también la velocidad terminal de la gota según la distribución de diámetros de gota; se determina el tiempo de caída de la gota según la velocidad terminal y la velocidad del flujo de vapor; se determina la velocidad relativa de salida de la gota con relación al flujo de vapor según el tipo de boquilla y la presión de agua aplicada a la boquilla que, a su vez, determinará la altura h_1 hasta que las gotas se ajustan a su velocidad terminal; se decide la altura h_2 de caída a velocidad terminal a lo largo de la cual se obtendrá

una eficiente transformación de energía potencial del agua líquida en mayor energía potencial del vapor en forma de mayor presión del vapor secundario comprimido.

La combinación de estos parámetros en el diseño del dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC acoplado a un intercambiador de calor latente de alta densidad de regiones de transición, permite la construcción de dispositivos de desalinización por compresión gravitacional de vapor GVCD, por sus siglas en inglés, con rendimientos energéticos agregados superiores o iguales al 60%, lo cual permite desalinizar agua de mar con una salinidad de 45.000 ppm sólidos disueltos totales por debajo de 1,7kWh/m³, cuando el actual récord es de 2,23kWh/m³ usando dispositivos de osmosis inversa.

En relación ahora con la Figura 1, donde se muestra una cámara de compresión vertical 16 con una entrada de vapor de agua 8 en la parte superior de la cámara 16. En la parte superior de cámara 16 se dispone una pluralidad de boquillas de agua líquida a las que se aporta agua a la presión necesaria para elevar el agua hasta la altura $h_1 + h_2$ y para formar espráis 10 de gotas de agua finas, inferiores o iguales a 300 micras de diámetro.

El dispositivo de compresión gravitacional de vapor GVC funcionaría con gotas de un diámetro superior o igual a 300 micras, pero cuanto mayor sea el diámetro de la gota mayor será su velocidad terminal y mayor será la altura necesaria de la cámara de compresión 16, lo cual comporta un mayor coste de construcción del dispositivo y un mayor coste energético de elevación del agua.

Actualmente existen en el mercado boquillas que forman un spray de gotas de diámetro entre 100 y 300 micras con un aporte de agua a una presión entre 1,5 y 3 bares y con velocidades absolutas de salida de las gotas de agua entre 10 y 20m/s.

A lo largo de la altura h_1 de la cámara de compresión, el flujo de caída de gotas de agua líquida en el medio gaseoso de vapor se produce disipación 9 de energía por la velocidad relativa del flujo de agua con respecto al flujo de vapor, superior a la velocidad terminal de la gota.

Cuando las gotas de agua llegan a su velocidad terminal en el medio gaseoso de vapor de agua, el flujo de gotas de agua líquida en el medio gaseoso de

vapor de agua pasa a ser un flujo ordenado, laminar 11 de caída vertical en el que la fuerza de gravedad sobre la gota es equilibrada por las fuerzas de arrastre y de flotabilidad de la gota en el medio gaseoso y las gotas caen a una velocidad relativa con relación al flujo gaseoso constante, a una velocidad terminal, a lo largo de la altura h_2 de la cámara 16 de compresión.

En el fondo inferior interior de la cámara 16 de compresión se acumula y se evacua el agua líquida 12 correspondiente a las gotas de agua líquida que han llegado al final de trayecto y que se vuelve a bombear, al menos en parte, a las boquillas superiores para formar nuevos espráis 10 de agua y el vapor de agua comprimido sale de la cámara 16 de compresión por un conducto 13 de salida del vapor de agua secundario de mayor presión y temperatura que el vapor primario de entrada 8.

En relación ahora con la Figura 2 donde se muestra un dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC acoplado mecánicamente a, al menos, un dispositivo de tubos o cámaras y carcasa 1 con, al menos, un intercambiador de calor 2 de alta densidad de regiones de transición. En la parte superior 3 de la cara interior de los tubos o cámaras del intercambiador de calor 2 de alta densidad de regiones de transición se aporta agua a desalinizar que fluye por la cara interior evaporadora de los tubos o cámaras intercambiadores de calor 2 y en la parte inferior interior 4 de los tubos o cámaras intercambiadores de calor sale agua de mar o salmuera 5 que se acumula en el fondo de la carcasa 1 y vapor de agua 7 que se aporta por, al menos, un conducto hasta la entrada de vapor de agua a comprimir 8 en la parte superior del compresor gravitacional de vapor GVC.

La salida del vapor de agua secundario 13 del compresor gravitacional de vapor GVC se conecta mediante un conducto de vapor hasta la entrada del vapor de agua secundario 14 en la cámara condensadora del intercambiador de calor latente y el vapor de agua comprimido se condensa sobre la cara condensadora exterior de los tubos o cámaras del intercambiador de calor 2 de alta densidad de regiones de transición. El agua condensada se acumula en el fondo de la cámara condensadora y se extrae 15 por un conducto evacuador.

En relación ahora con la Figura 3 donde se muestra la interfaz liquido gas curvada o menisco líquido de solución acuosa a desalinizar en una cara

- evaporadora del, al menos un, tubo o cámara del, al menos un, intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición se divide en tres regiones: la región de adsorción 23 donde la película líquida delgada se mantiene fuertemente adherida al sustrato sólido 17 de la pared del tubo o cámara evaporador condensador por las fuerzas intermoleculares entre el líquido y el sólido, en esta región de adsorción 23 la resistencia térmica por conducción es pequeña y la resistencia térmica interfacial es grande de forma que la evaporación es casi inexistente en esta región de adsorción 23, la región masiva 18 del menisco con una gran resistencia térmica por conducción térmica debida al grosor de la capa de agua y en la que la resistencia interfacial térmica es pequeña, y la región de transición 19 que se caracteriza por tener la menor resistencia térmica agregada y permitir el mayor flujo Q de calor por unidad de superficie con la región de transición 22 condensadora
- En relación con la Figura 3 donde también se muestra la interfaz líquido gas curvada o menisco de agua condensada sobre la cara condensadora del intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición se divide en tres regiones: la región de adsorción 20, la región masiva 21 del menisco y la región de transición 22. Al colocar en proximidad las regiones de transición 19 y 22, a ambos lados de la pared 17 del tubo o cámara evaporadora-condensadora de un tubo o cámara de intercambio de calor de alta densidad de regiones de transición, se consigue un pasaje de intercambio de flujo Q de calor por el que el calor latente liberado por el vapor 14 condensado sobre la región de transición 22 condensadora fluye con una baja resistencia térmica y con un bajo gradiente térmico hacia la región de transición 19 evaporadora donde la energía Q es absorbida, al menos en parte, como calor latente de evaporación para el vapor 7 evaporado desde la cara evaporadora.
- Una alta densidad de regiones de transición en la cara condensadora y en la cara evaporadora consiguen un alto coeficiente de transferencia de calor por unidad de superficie y unidad de gradiente de temperatura del tubo o cámara evaporador condensador, lo cual permite operar con bajos diferenciales de temperatura entre la cara evaporadora y la condensadora. Asimismo, el diseño de la superficie condensadora con microcanales asegura el drenaje

pasivo ordenado del agua condensada por capilaridad dentro de los microcanales, asegurando la existencia de superficies libres de películas de agua térmicamente aislantes.

En relación ahora con la Figura 4, la cara condensadora tiene zonas libres de agua donde el vapor 24 se condensa directamente sobre la cara condensadora de la pared 17 de, al menos, un tubo o cámara evaporador-condensador.

Estas zonas libres de agua se producen por diseño de la cara condensadora con zonas parcialmente recubiertas de una capa hidrófuga que repele rápidamente las gotas que se forman por condensación, también se producen como resultado de efectos de oscilaciones dinámicas libres o forzadas en el flujo del agua condensada dentro de la estructura condensadora y también se producen por diseño de los microcanales con una profundidad superior a la cubierta por el flujo de agua condensada.

La proximidad de las regiones de transición evaporadora 19 con regiones de transición condensadoras 22 y con zonas de condensación de vapor 24 sin agua de la cara condensadora crea vías de alto flujo Q_1 , Q_2 de calor y baja resistencia térmica.

La Figura 5, muestra de forma esquemática un corte transversal, perpendicular al flujo de solución acuosa de la cara evaporadora y del flujo de agua condensada sobre la cara condensadora, de un segmento de pared 25 de un tubo o una cámara evaporador-condensador de un intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición que muestra el perfil curvado de la interfaz líquido gas del flujo de solución salina 26 a evaporar que fluye dentro de un microcanal de la cara evaporadora, con curvatura de la interfaz líquido gas en toda la amplitud de pared a pared del microcanal, y el perfil curvado de la interfaz líquido gas del flujo de agua 27 condensada que fluye dentro de un microcanal de la cara condensadora, con curvatura de la interfaz líquido gas en toda la amplitud de pared a pared del microcanal.

La curvatura de la interfaz líquido-gas a lo ancho de los microcanales que cubren, al menos en parte la cara evaporadora y por los que fluye la solución salina a evaporar 26 consigue una alta densidad de regiones de transición 19 en la curvatura de la interfaz líquido-vapor de la solución salina a desalinizar y con la consiguiente alta densidad de zonas con un elevado flujo de calor

latente de evaporación que absorbe el vapor evaporado 7. La curvatura de la interfaz líquido-gas a lo ancho de los microcanales que cubren, al menos en parte, la cara condensadora y por los que fluye el agua condensada 27 consigue una alta densidad de regiones de transición 22 en la curvatura de la interfaz líquido-vapor del agua condensada y con la consiguiente alta densidad de zonas con un elevado flujo de calor latente de condensación liberado por el vapor condensado 14.

La forma sinusoidal de la pared 25 alterna en inversiones sucesivas, con rotaciones de 180°, un menisco evaporador 26 y un menisco condensador 27 en simetría inversa, de forma que la región de transición condensadora 22 de un menisco condensador 27 en donde se produce la condensación de vapor 14 liberando calor latente de condensación con un mayor flujo de energía por unidad de superficie, queda en proximidad de una región de transición evaporadora 19 de un menisco evaporador 26 absorbiendo calor latente de evaporación y generando vapor primario 7 con un mayor flujo de energía absorbida por unidad de superficie. La elevada densidad de regiones de transición que se producen en esta estructura alternante de microcanales evaporadores y microcanales condensadores u otra estructura en diente de sierra, zigzag o similar consiguen una alta densidad de trayectos de alto flujo Q_1 de energía en forma de calor latente liberado en la región de transición condensadora 22 y una alta densidad de trayectos de alto flujo Q_2 de energía en forma de calor latente liberado en una superficie libre de agua de la cara condensadora donde condensa vapor 24, que fluyen hasta la región de transición 19 evaporadora de la cara evaporadora donde la energía es absorbida en forma de calor latente de evaporación en la generación de vapor primario 7.

Una forma de realización de los tubos o cámaras intercambiadores de calorevaporador-condensador con pared 25 sinusoidal, en zigzag, diente de sierra o similar es por extrusión de aleaciones de aluminio o por estampado formando unos microcanales de 1mm de profundidad y de 1mm de ancho de cumbre a cumbre de cada microcanal. La profundidad mayor a 1mm gestiona mayores caudales y se consiguen tubos o cámaras evaporadores condensadores de mayor longitud. La profundidad de los microcanales menor o igual a 1 mm, resulta en más canales por unidad de perímetro del

tubo o cámara evaporador condensador y, en consecuencia, se aumenta el número de regiones de transición por unidad de superficie de tubo o cámara evaporador condensador. Para anchos de los microcanales superiores a 1mm a medida que se aumenta el ancho aparecen zonas planas, sin curvatura, de la interfaz líquido vapor, se reduce la densidad de regiones de transición y se reduce la eficiencia del intercambiador de calor. En estas zonas planas de la interfaz líquido vapor la transmisión de calor latente tanto de evaporación como de condensación es muy poco eficiente lo que penaliza la eficiencia del intercambiador de calor. La forma sinusoidal se modifica con un perfil de extremos en ángulo, creando una forma en zigzag, o con extremos planos, creando una forma almenada, en lugar de extremos redondeados de la sinusoidal.

La elevada densidad de regiones de transición es inalcanzable con los actuales tubos o cámaras evaporadores-condensadores de doble estriado, double fluted, diseñados para crear turbulencia en los flujos de agua descendentes dado que en estos tubos se formarían amplias zonas de interfaz líquido gas plana, y es inalcanzable con tubos estriados o ranurados en una sola cara dado que ello resultaría en la ausencia de regiones de transición en la cara no estriada o ranurada.

La incorporación de un compresor gravitacional de vapor GVC a un dispositivo de carcasa y tubos o cámaras con, al menos, un intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición realiza ciclos de evaporación de agua de mar de 45.000ppm sólidos disueltos totales de salinidad y condensación del vapor de agua secundario comprimido por el compresor gravitacional de vapor GVC con diferencias de presión en torno a 100Pa entre la presión del valor primario evaporado 7 en la cara evaporadora interior de los tubos o cámaras del intercambiador de calor 2 de alta densidad de regiones de transición y la presión del vapor secundario comprimido 14 condensado en la cara condensadora del haz de tubos del intercambiador de calor 2 de alta densidad de regiones de transición. Este incremento de presión del vapor de agua se consigue con una eficiencia energética agregada del compresor gravitacional de vapor GVC en toda su altura, h_1 más h_2 , superior al 60%, lo cual resulta en consumos específicos de energía para desalinizar agua de mar de 45.000ppm sólidos disueltos totales por debajo de 1,7kWh/m³ de agua

producida, cuando el actual récord de consumo específico de energía para desalinización está en 2,23 kWh/m³ y utilizando dispositivos de osmosis inversa.

REIVINDICACIONES

- 1.** Un dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC, **caracterizado** por que el dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC comprende al menos una cámara (16) vertical de compresión, una pluralidad de boquillas de generación de espráis (10) de gotas que forman un flujo de gotas en el flujo de vapor de agua a lo largo de una altura h_1 de la carcasa vertical 16 en el que las gotas de los haces de gotas (10) ajustan su velocidad hasta llegar a una velocidad igual o similar a la velocidad terminal de caída en relación al flujo de gas, comprende una altura h_2 de la cámara de compresión 16 en la que las gotas de agua caen en flujo ordenado (11) con una velocidad de las gotas igual o próxima a la velocidad terminal de las gotas en un flujo de vapor de agua y comprimen el vapor de agua y comprende un conducto de salida de vapor secundario (13).
- 2.** Dispositivo compresor de acuerdo con la reivindicación 1, donde el dispositivo compresor gravitacional de vapor GVC está acoplado mecánicamente a un dispositivo evaporador condensador (1), el vapor primario a comprimir (8) proviene del vapor evaporado (7) de la cara evaporadora de los tubos o cámaras evaporadores condensadores de un intercambiador de calor (2) de alta densidad de regiones de transición y el vapor secundario (13) se aporta como vapor a condensar (14) en la cara condensadora de los tubos o cámaras evaporadores condensadores de un intercambiador de calor (2) de alta densidad de regiones de transición.
- 3.** Dispositivo compresor acoplado mecánicamente a un dispositivo evaporador condensador de acuerdo con la reivindicación 2, donde el dispositivo evaporador condensador (1) comprende al menos un intercambiador de calor (2) de alta densidad de regiones de transición donde la cara evaporadora está cubierta, al menos en parte, de microcanales por los que fluye la solución salina a evaporar con la interfaz líquido gas curvada en todo el ancho de pared a pared del microcanal y por tener la cara condensadora cubierta, al menos en parte, de microcanales por los que fluye el agua condensada con la interfaz líquido gas curvada en todo el ancho de pared a pared del microcanal.
- 4.** Dispositivo compresor acoplado mecánicamente a un dispositivo evaporador condensador (1) de acuerdo con la reivindicación 3, donde el

intercambiador de calor de alta densidad de regiones de transición está **caracterizado** por que la región de transición (19) de un menisco o curvatura de la interfaz líquido gas de la cara evaporadora está en proximidad de una región de transición (22) de un menisco o curvatura de la interfaz líquido gas de agua de la cara condensadora o de una zona libre de agua de la cara condensadora sobre la que se condensa vapor (24) y se crea una vía de transferencia rápida de calor latente en la que el flujo de energía en forma de calor latente liberado por el vapor (14) condensado sobre la región de transición condensadora (22) de la cara condensadora o el vapor (24) condensado sobre una zona libre de agua de la cara condensadora fluyen con baja resistencia térmica, con un bajo gradiente de temperatura y con un elevado flujo de calor a la región de transición evaporadora (19) de la cara evaporadora donde el flujo de energía se transforma, al menos en parte, en calor latente de evaporación del vapor (7) evaporado.