



ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CON ADSORCIÓN

JESÚS GUALLAR PARACUELLOS, ISABEL LORENTE CALVO

Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica
Grupo de Ingeniería Térmica y Sistemas Energéticos
María de Luna s/n, 50018 Zaragoza, España

(Recibido 2 de abril de 2004, para publicación 12 de julio de 2004)

Resumen – Este trabajo estudia la producción de frío mediante adsorción, es un procedimiento de refrigeración o climatización cada vez más utilizado, y tiene ventajas con respecto a otros sistemas convencionales de climatización: tecnología limpia y sencilla, y no cuenta con partes mecánicas. Se analizan las teorías que describen el fenómeno de adsorción [1], y las ecuaciones propuestas se ajustan a las condiciones de operación y a cada par de adsorbente-adsorbato.

1. INTRODUCCIÓN

La adsorción es un proceso reversible mediante el cual un gas es fijado en un sólido, habitualmente un material poroso. El sólido que adsorbe es el adsorbente y el material gaseoso adsorbido en la superficie es el adsorbato. También es un proceso exotérmico, el calor es debido a la condensación del adsorbato más la energía generada en la unión adsorbente-adsorbato. A su vez, la desorción es el proceso inverso de la adsorción y constituye un proceso endotérmico. Estas características presentadas por el fenómeno de la adsorción/desorción, son las que hacen que pueda ser aplicado a los sistemas de climatización [2, 4].

La unidad básica de refrigeración por adsorción consiste principalmente en: uno o varios adsorbedores, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador.

El ciclo de refrigeración por adsorción básico consta de cuatro etapas, que se describen a continuación, y que aparecen en la Figura 1:

1ª etapa: Calentamiento + presurización (Proceso A-B)

El adsorbedor recibe calor (Q_{HS}) de una fuente externa mientras permanece cerrado. La temperatura del adsorbente aumenta, lo cual provoca que la presión del adsorbato gas en el sólido aumente desde la presión de evaporación, P_e hasta la de condensación, P_c . Estas dos presiones se pueden considerar constantes y vienen determinadas por sus respectivas temperaturas de evaporación y condensación, T_e y T_c .

2ª etapa: Calentamiento y desorción + condensación (Proceso B-C)

A lo largo de este proceso, el adsorbedor continúa recibiendo calor y está conectado al condensador, el cual determina su presión. La temperatura del adsorbente sigue aumentando, con lo que la presión del adsorbato sigue aumentando también, hasta que llega un momento en el que supera la presión del condensador, y esta diferencia de presiones hace que el adsorbato sea desorbido en forma de vapor para ser licuado posteriormente en el condensador. Éste cede calor al exterior a una temperatura intermedia.

3ª etapa: Enfriamiento + despresurización (Proceso C-D)

El adsorbedor libera calor (Q_{CS}) mientras permanece cerrado y la temperatura del adsorbente comienza a disminuir, provocando que la presión disminuya desde el valor de condensación al de evaporación.

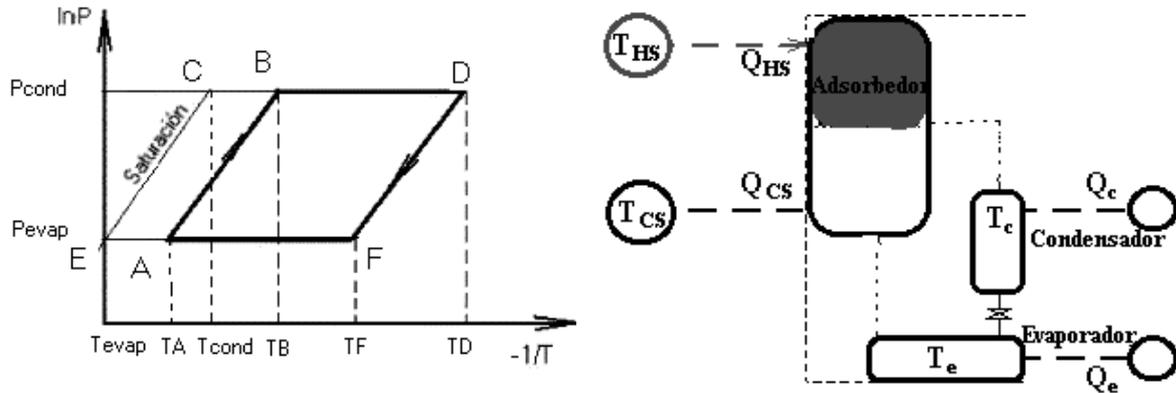


Fig. 1. Diagrama de Clapeyron y esquema de operación del ciclo básico de refrigeración por adsorción.

4ª etapa: Enfriamiento y adsorción + evaporación (Proceso D-A)

En esta última etapa, es donde se va a obtener el efecto útil, es decir, la refrigeración. El adsorbedor continúa cediendo calor, ahora conectado con el evaporador, que determina su presión. La temperatura del adsorbente disminuye de manera que baja también la presión hasta que es menor que la presión de evaporación y provoca que el adsorbato sea adsorbido de nuevo por el adsorbente. Para ello, el adsorbato va a necesitar de un calor que le permita evaporarse y poder ser adsorbido. Este calor se obtiene en el evaporador, del material que se halle en este, la mayoría de las veces agua, que al ceder su calor al adsorbato se enfriará hasta llegar incluso a congelarse, y es en este momento en el que se obtiene el efecto refrigerante.

Los sistemas de refrigeración por adsorción tienen las siguientes ventajas: no utilizan CFC's, utilizan energía térmica de baja temperatura, permiten la utilización de energía solar, y no tienen partes mecánicas. También presentan una serie de inconvenientes: COP bajos, son discontinuos, y los costes de inversión son altos.

2. MECANISMO DE ADSORCIÓN [1, 5, 7]

El adsorbente debe tener una elevada capacidad de adsorción, lo cual se conseguirá con un área superficial específica grande. Es decir, cuanto mayor número de poros tengamos en la superficie del material adsorbente y mayor sea la variedad de tamaños, más adecuado va a resultar el material para ser utilizado como adsorbente. Esta característica va a determinar la accesibilidad del adsorbato en la superficie de adsorción.

Entre los materiales que se usan como adsorbente, hay que destacar dos tipos: aquellos que poseen una distribución de tamaños de poro uniforme, como son las fibras de carbón activo, y aquellos que poseen una distribución de tamaños de poro no uniforme y siguen una distribución normal de Gauss, como es el caso de los carbones activos y las zeolitas, de los cuales existe una gran variedad. Aunque estos son los materiales más utilizados, se pueden utilizar también otros como son los geles de sílice.

Como adsorbato, los materiales que son utilizados principalmente, son el metanol formando par de adsorción con los carbones activos y las fibras de carbón activo, y el agua formando par de adsorción con las zeolitas. Actualmente existen básicamente dos expresiones para calcular la cantidad de adsorbato retenido por el adsorbente:

$$\text{Dubinin-Radushkevich [5]} \quad x = x_0 \cdot \exp\left(-k\left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)^2\right) \quad (1)$$

Dubinin-Astakhov: [5]

$$x = x_0 \cdot \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{E}\right)^n\right) \quad (2)$$

donde:

- x masa de adsorbato adsorbida (kg adsorbato/kg adsorbente)
- x_0 capacidad límite de adsorción (kg adsorbato/kg adsorbente)
- k, n constantes determinadas por la estructura del adsorbente
- β = coeficiente de afinidad determinado por el par adsorbente/adsorbato
- ε = energía potencial de adsorción
- E = trabajo característico de adsorción

La energía potencial de adsorción, ε se obtiene por:

$$\varepsilon = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \quad (3)$$

siendo p_0 la presión de saturación específica, si en esta ecuación se sustituyen las presiones por fugacidades, para ajustar más los resultados a la realidad, se tiene:

$$\varepsilon = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{f_0}{f}\right) \quad (4)$$

Si se sustituye la ecuación (4) en la de Dubinin-Radushkevich, se obtiene la ecuación:

$$x = x_0 \cdot \exp\left(-k\left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)^2\right) = x_0 \cdot \exp\left(-B\left(\frac{T^2}{\beta^2} \ln^2\left(\frac{f_0}{f}\right)\right)\right) \quad (5)$$

en la que B es una constante que engloba al resto de constantes, y depende del tamaño de poro.

Con la ecuación (5), para obtener unos resultados más ajustados a la realidad, se deben utilizar valores de las constantes x_0 y B diferentes para cada tamaño de poro, y la ecuación tendrá la siguiente forma:

$$x = \sum_j x_{0j} \cdot \exp\left(-B_j\left(\frac{T^2}{\beta^2} \ln^2\left(\frac{f_0}{f}\right)\right)\right) \quad (6)$$

Se considera que los tamaños de poro siguen una determinada distribución y que la integral de cero a infinito de esta distribución ha de ser igual a 1 [5]:

$$\int_0^{\infty} f(B) dB = 1 \quad (7)$$

y además:

$$x = \int_0^{\infty} x(T, p, B) \cdot f(B) dB \quad (8)$$

En materiales con una distribución de tamaño de poro uniforme, se utiliza la ecuación de Dubinin-Astakhov, se considera que para todos los tamaños hay el mismo número de poros. Así pues, la distribución será de la forma:

$$f(B) = \frac{1}{B_2 - B_1} \quad (9)$$

Se considera que B_2 es el tamaño de poro máximo y B_1 el tamaño mínimo y que además, la diferencia entre ambos es muy pequeña (ver figura 2). Si se introducen la ecuación (9) y la ecuación de Dubinin-Astakhov en la ecuación (8) y se hacen las transformaciones necesarias, se obtiene la ecuación que va a describir el mecanismo de adsorción para materiales con una distribución de tamaños de poro uniforme:

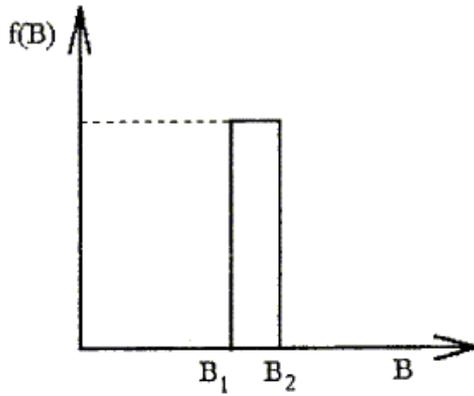


Fig. 2. Distribución uniforme.

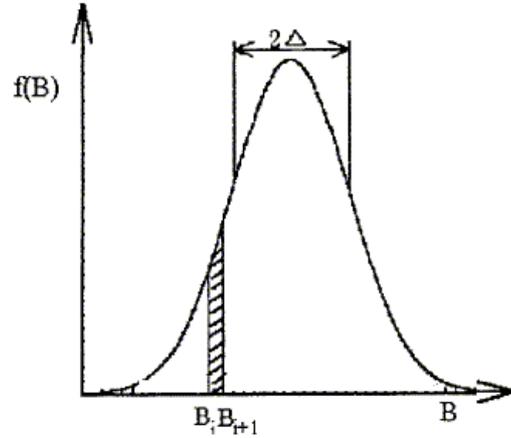


Fig. 3. Distribución no uniforme.

$$x = x_0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{R \cdot T \cdot \ln(f_0 / f)}{E_x} \right)^n \right] \quad (10)$$

donde x_0 , E y n , distintos para cada material, se obtienen experimentalmente o de la bibliografía.

La ecuación (10) es válida cuando además de distribución de tamaño uniforme tenemos adsorbatos débilmente polares como en el par fibras de carbón activo-metanol.

En materiales con una distribución de tamaño de poro no uniforme, se considera que los tamaños de poro de los materiales sigue una distribución gaussiana normal (ver figura 3), de forma que:

$$f(B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \cdot \exp \left[- \frac{(B - B_0)^2}{2\Delta^2} \right] \quad (11)$$

Si se introducen las ecuaciones de Dubinin-Radushkevich y (11) en la ecuación (8) y se consideran las variables intermedias “ y ” y “ γ ” para simplificar los cálculos y después de las modificaciones matemáticas oportunas, se llega a la ecuación (14) que describe el mecanismo de adsorción para materiales con una distribución de tamaño de poro no uniforme.

$$y = \left(\frac{T}{\beta} \right)^2 \ln^2 \left(\frac{f_0}{f} \right) \quad (12)$$

$$\gamma = y - \frac{B_0}{\Delta^2} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$x = x_0 \cdot \exp(-B_0 \cdot y) \cdot \exp \left(\frac{y^2 \cdot \Delta^2}{2} \right) \cdot \frac{[1 - \operatorname{erf}(\gamma)]}{2} \quad (14)$$

donde $\operatorname{erf}(\gamma)$ es la función de error, x_0 , B_0 y Δ son coeficientes determinados experimentalmente u obtenidos de la bibliografía y diferentes para cada material. La ecuación (14) resulta apropiada para estudiar los pares formados por carbón activo-metanol y zeolita-agua.

3. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES [5, 7]

Se ha realizado un estudio de las propiedades que presentan varios pares de materiales ante la adsorción. Para ello se ha implementado un programa en EES (Engineering Equation Solver) que permite ob-

Tabla 1. Parámetros de los pares de adsorción relacionados con ecuación (14).

Par de adsorción	x_0 (kg/kg)	E (kJ/mol)	n
JIAACF-metanol	0.342	6.703	1.346
SYACF-metanol	0.606	3.904	0.904
NTACF-metanol	0.602	7.674	1.272

Tabla 2. Parámetros de los pares de adsorción relacionados con ecuación (10).

Par de adsorción	x_0 (kg/kg)	E (kJ/mol)	n
JIAACF-metanol	0.342	6.703	1.346
SYACF-metanol	0.606	3.904	0.904
NTACF-metanol	0.602	7.674	1.272

tener la capacidad de adsorción en kg adsorbato/kg adsorbente, x , o en m^3 adsorbato/kg adsorbente, W , o la energía potencial de adsorción para diferentes pares de materiales y para diferentes condiciones de presión y temperatura. El programa permite, además, la obtención de gráficas que comparan el comportamiento de un determinado par de materiales bajo diferentes condiciones de operación, o la obtención de otras gráficas que comparan el comportamiento de todos los pares bajo las mismas condiciones de trabajo. Se han estudiado tres pares de materiales con una distribución de tamaño de poro no uniforme (carbón activo YKAC-metanol, carbón activo SXAC-metanol y zeolita-agua) y tres pares con una distribución uniforme que son fibras de carbón activo con metanol (JIAACF-metanol, SYACF-metanol y NTACF-metanol). Las constantes características de cada par de materiales [5] se muestran en las tablas 1 y 2.

El tratamiento de los datos experimentales ha permitido determinar los coeficientes que intervienen en las ecuaciones (10) y (14) y se encuentran alrededor del 5 % [7].

4. CONFIGURACIONES DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN

4.1. Ciclo básico [3,7]

Es el que aparece reflejado en la Figura 1 anterior, se considera que el calor total que el colector solar (o cualquier otro medio de aporte de energía térmica) hace llegar al sistema es:

$$Q_T = Q_{AB} + Q_{BD} \quad (15)$$

La energía de refrigeración conseguida con este sistema va a venir dada por la siguiente ecuación:

$$Q_{enf} = (x_A - x_D) \cdot M_{cz} \cdot (L - (h_{cond}(x=0) - h_{evap}(x=0))) \quad (16)$$

ecuación en la que $L = h_g - h_f$, es decir, el calor latente de evaporación, que será determinado como la diferencia entre la entalpía de vapor saturado ($x = 1$) y la de líquido saturado ($x = 0$) a la temperatura de evaporación.

El coeficiente de operación vendrá dado por:

$$COP = \frac{Q_{enf}}{Q_T} \quad (17)$$

La simulación del comportamiento del ciclo básico de refrigeración por adsorción en EES, permite analizar la influencia que ejerce cada una de las temperaturas características del sistema en el comportamiento de éste, o con qué par de materiales se obtiene un mayor coeficiente de operación.

Un aumento de la temperatura de condensación, T_{conds} , provoca una disminución del coeficiente de operación, debido a que al aumentar esta temperatura, aumenta la presión del sistema, provocando que la

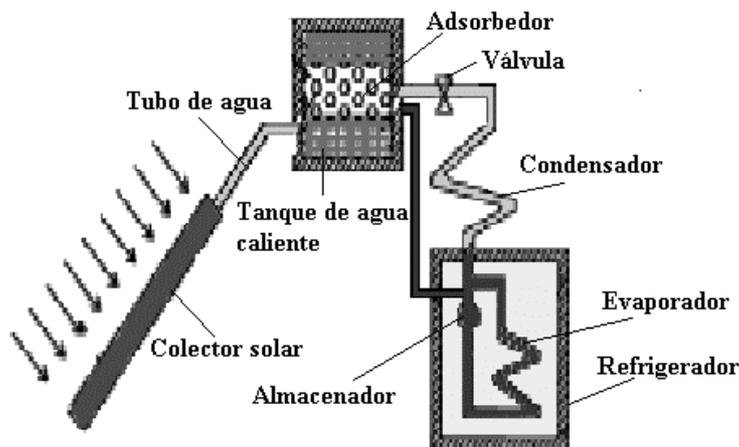


Fig. 4. Sistema solar: agua caliente + refrigeración.

cantidad de adsorbato desorbida sea menor, lo cual lleva a una disminución del COP . La temperatura de evaporación, T_{evap} , por el contrario, va a hacer que aumente el coeficiente de operación cuando ella aumenta. Esta temperatura vendrá determinada por la temperatura de refrigeración que se quiera obtener en el sistema en cuestión, y será unos grados inferior a ésta. La temperatura de adsorción, T_A , al igual que la temperatura de condensación, hace que el COP disminuya al aumentar ésta. Ambas vendrán determinadas por el ambiente.

El COP aumenta cuando la temperatura de desorción aumenta, pero va a llegar un momento en el que se va a hacer máximo y va a comenzar a decrecer ligeramente, lo cual es debido a que al superar cierta temperatura el adsorbato puede sufrir alteraciones en sus características.

Si no se tienen en cuenta los resultados obtenidos con el par zeolita-agua, pues es un par de materiales con unas características muy diferentes a las que presentan el resto de pares estudiados, el mayor COP lo ofrece el par formado por la fibra de carbón activo NTACF-metanol. Las temperaturas aproximadas a las que se obtiene el COP máximo son: $T_{cond} = 30$ °C, $T_A = 25$ °C, $T_{evap} = 0$ °C y $T_D = 112$ °C, obteniéndose un $COP = 0,716$. Con el par zeolita-agua se puede llegar a obtener hasta un $COP = 0,8240$ con $T_{cond} = 35$ °C, $T_A = 25$ °C, $T_{evap} = 2$ °C y $T_D = 162$ °C [7].

4.2. Calentador de agua y refrigerador con adsorción solar [7]

En este caso, el lecho de adsorción, en lugar de estar dentro del colector solar, como en el caso del ciclo básico, se halla en el interior de un tanque de agua, que será utilizada para usos domésticos. El esquema del sistema se muestra a continuación (Figura 4).

El agua del tanque se va calentando a lo largo del día, gracias a la energía que va captando el colector solar. Como el lecho de adsorción se halla situado dentro del tanque, a la vez que se va calentando el agua se va calentando también el lecho, provocando que se inicie el ciclo de refrigeración por adsorción, concretamente el semiciclo de desorción.

Por la noche, el agua caliente del tanque es extraída bien para ser usada directamente, bien para introducirla en otro tanque y dosificar su uso. En el tanque se introduce agua fría, que hace que comience a enfriarse también el lecho y que comience el semiciclo de adsorción. Este sistema ha sido analizado para una instalación solar situada en la ciudad de Zaragoza, por lo que todo ha venido determinado por la temperatura y la radiación solar en cada época del año [7].

Se ha implementado un programa en EES que permite analizar el sistema para todos los meses del año, estando determinada para cada mes la temperatura ambiente, la temperatura del agua de tubería y la irradiación solar. El programa permite también elegir el área, la inclinación y el rendimiento del colector solar, así como el par de materiales con que se quiere trabajar, la temperatura de evaporación, la capaci-

dad del tanque de agua y las masas de adsorbente y adsorbedor. La temperatura de condensación se ha considerado 10 K por encima de la temperatura ambiente.

Aunque el programa permite trabajar con los seis pares de materiales analizados en los apartados anteriores, sólo se ha analizado en detalle el funcionamiento del sistema con los pares fibra de carbón activo NTACF-metanol y zeolita-agua, por ser los que mejores coeficientes de operación presentan y ser, además, pares con características muy diferentes entre sí. El programa permite también la obtención de gráficas de los coeficientes de operación y las energías frente a diferentes parámetros, tales como el mes del año, la inclinación del colector, el área de éste o la capacidad del tanque de agua. Los mejores resultados dependerán de cuál es el efecto que más interesa, la refrigeración o la obtención de agua caliente.

Se aprecia que cuando lo que interesa principalmente es la refrigeración, pues es el tema que se está estudiando, ofrece unas buenas condiciones el mes de marzo, una inclinación del colector de 30° y un área de unos 2 m². Puede observarse que la influencia de la capacidad de tanque es muy pequeña y se ha considerado en la mayoría de los cálculos una capacidad de 50 litros [7].

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Z. Wang, J. Y. Wu, Y. X. Xu, T. Teng, W. Shi., “Experiments on a continuous regenerative adsorption refrigerator using spiral plate heat exchanger as adsorbers”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18, Nos 1-2, pp 13-23, Institute of refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China, Abril 1998.
- [2] A. O. Dieng, R. Z. Wang. “Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and air-conditioning purposes and recent developments in solar technology”, *Renewable & Sustainable energy reviews*, Institute of refrigeration and cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China, Febrero 2001, www.elsevier.com/locate/rser.
- [3] Z. F. Li, Sumathy, “A solar powered ice-maker with the solid adsorption pair of Activated Carbon and Methanol”, Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, 1999.
- [4] S. Eichengrün, “Theoretische und experimentelle Untersuchung des dynamischen Verhaltens von periodisch arbeitenden Sorptionskälteaggregaten” Lehrstuhl C für Thermodynamik der Technischen Universität München, O. Prof. Dr. Edgar R. F. Winter.
- [5] R. Z. Wang, Q. B. Wang, “Adsorption mechanism and improvements of the adsorption equation for adsorption refrigeration pairs” Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030 China, 1999.
- [6] R.Z. Wang, “Adsorption refrigeration research in Shanghai Jiao tong University”, *Renewable & sustainable energy reviews*, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China, 2000, <http://www.elsevier.com/locate/rser>.
- [7] M. I. Lorente, “Estudio de sistemas de climatización con adsorción”, Proyecto Fin de Carrera, 2002, Área de Máquinas y Motores Térmicos, CPS, Universidad de Zaragoza.

MODELING OF CLIMATIZATION SYSTEMS WITH ADSORTION

Abstract – This paper studies the cold production with adsorption, a process which is used more and more. It presents some advantages compared with conventional refrigeration systems: non-polluting technology, simple construction and no moving components. The theories that describe the adsorption process [1] are analyzed and each equation adapts to the work conditions and to the adsorbent/adsorbate pair.

