

УДК 621.11:541.183:532(078.8)

ТЕПЛОМАССООБМЕН В ПОРАХ АДсорбЦИОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Драганов Б.Х.<sup>1</sup>, доктор технических наук, Долинский А.А.<sup>2</sup>, академик НАН Украины

<sup>1</sup> *Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 15, Киев, 03041, Украина.*

<sup>2</sup> *Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

Аналізуються основні характеристики гетерогенних систем і процесу адсорбції. Наведено моделювання теплообміну в пористих середовищах. Визначено виробництво ентропії аналізованих явищ.

Анализируются основные характеристики гетерогенных систем и процесса адсорбции. Приведено моделирование теплообмена в пористых средах. Определено производство энтропии анализируемых явлений.

Basic descriptions of the heterogeneous systems and process of adsorption are analysed. A design over of heat exchange is brought in porous environments. The production of entropy of the analysable phenomena is certain..

Библ.13.

**Ключевые слова:** адсорбция, пористая среда, адсорбционный тепловой насос, правило фаз по Гиббсу, уравнение Гиббса-Дюгема, преобразование Ханкеля и Лапласа, функция Бесселя, производство энтропии.

Цель исследования: разработать метод моделирования тепломассобменных процессов в микропористых каналах адсорбционных тепловых насосов.

Материалы и метод исследований. Анализируемый объект представляет собой гетерогенную систему. В химической термодинамике гетерогенную систему обычно рассматривают как совокупность однородных фаз и используют приближенное свойство аддитивности, согласно которому экстенсивные величины для системы в целом (внутренняя энергия  $U$ , энтропия  $S$  и т.п.) равны сумме соответствующих значений этих величин для отдельных фаз [1]. При таком подходе, который имеет определенное практическое значение, исключается возможность описания поверхностных явлений, обусловленных существованием физических границ между фазами.

С другой стороны, гетерогенную систему можно рассматривать как целое, не деля ее на однородные фазы. Для  $n$ -компонентной (открытой) системы в целом будет справедливо фундаментальное уравнение

$$dU = TdS + \sum_{j=1}^k X_j dx_j + \sum_{i=1}^n \mu_i dm_i, \tag{1}$$

где  $U$  – внутренняя энергия системы;  $S$  – ее энтропия;  $T$  – абсолютная температура;  $X_j$  – обобщенная сила, действующая на систему;  $x_j$  – соответствующая ей обобщенная координата;  $\mu_i$  – химический потенциал  $i$ -ого компонента;  $m_j$  – его масса (выраженная, например, в молях). Уравнение (1) обладает свойством фундаментальности в том смысле, какой придавал этому понятию Гиббс [2].

Результаты исследования. Из свойства аддитивности следует, что полный дифференциал любой экстенсивной функции  $Y$  гетерогенной  $r$  – фазной системы равен сумме полных дифференциалов этой функции для отдельных фаз [3]:

$$dY = dY^{(1)} + dY^{(2)} + \dots + dY^{(r)}, \tag{2}$$

$$Y^{(1)} = \sum_{i=1}^{n^{(1)}} m_i^{(1)} \bar{Y}_i^{(1)}, \tag{3}$$

$$Y^{(2)} = \sum_{i=1}^{n^{(2)}} m_i^{(2)} \bar{Y}_i^{(2)}. \tag{4}$$

Для однородных фаз 1 и 2 можно записать уравнение Гиббса-Дюгема [4]:

$$\sum_{j=1}^k x_j^{(1)} dX_j^{(1)} + S^{(1)} dT^{(1)} + \sum_{i=1}^{n^{(1)}} m_i^{(1)} d\mu_i^{(1)} = 0, \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^k x_j^{(2)} dX_j^{(2)} + S^{(2)} dT^{(2)} + \sum_{i=1}^{n^{(2)}} m_i^{(2)} d\mu_i^{(2)} = 0. \tag{6}$$

Уравнения (5) и (6) дают связь между приращениями интенсивных переменных, характеризующих фазы.

Пористая среда широко используется в процессах аккумуляирования тепла, в том числе и в адсорбционных тепловых насосах [4].

Исходная система уравнений движения для осесимметричного и стационарного случая процессов тепло-массообмена записывается так:

- состояния:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho b) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v) = 0, \tag{7}$$

- движения в направлении координаты  $z$ :

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v u) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v u) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_\ell \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_\ell \frac{\partial u}{\partial r} \right) - f \frac{\mu_\ell u}{K} - f \frac{\rho F}{\sqrt{K}} |u| u, \tag{8}$$

- движения в направлениях радиуса  $r$ :

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v u) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v u) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_\ell \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_\ell \frac{\partial u}{\partial r} \right) - f \frac{\mu_\ell u}{K} - f \frac{\rho F}{\sqrt{K}} |u| u - \frac{\mu_\ell v}{r^2} n, \tag{9}$$

где  $u, v$  – компоненты скорости;  $\rho$  – плотность;  $f$  – параметры, определяющие степень пористости исследуемого тела;  $\mu_e$  – эффективная вязкость;  $K$  – площадь,  $m^2$ ;

$F$  - показатель интенсивности;

$$|u| = (u^2 + v^2)^{0,5} \text{ м/с.}$$

Уравнение энергии, если пренебречь эффектом диссипации, в силу вязкости, а также теплообменом, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_e c_e u T) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_e c_e r^n v T) = \frac{\partial}{\partial z}(k_e \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n k_e \frac{\partial T}{\partial r}), \quad (10)$$

где  $k_e$ ,  $c_e$  и  $\rho_e$  - соответственно, эффективный коэффициент теплопроводности, эффективный коэффициент теплообмена и эффективная плотность.

Анализ теплообмена в пористых средах в адсорбционных процессах.

Можно принять, что основным процессом передачи тепла является теплопроводность. Задача формулируется следующим образом: дано ограниченный цилиндр ( $-h < z < h$ ,  $w < r < R$ ), который изначально имеет температуру, равную температуре окружающей среды  $T_0$ . В начальный момент времени боковая поверхность цилиндра и поверхности торцов начинают нагреваться с постоянной скоростью  $b$  град/с, где  $b \leq \lambda / \sqrt{\alpha}$  - коэффициент тепловой активности ( $\lambda$  - теплопроводность;  $\alpha$  - температуропроводность).

Согласно формулировке задачи математическая модель формулируется в виде двухмерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]. \quad (11)$$

Краевые условия записываются следующим образом:

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad (12)$$

$$T(r, h, \tau) = T(R, z, \tau) T_0 + b \tau, \quad (13)$$

$$\frac{\partial T(r, 0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial T(0, z, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (15)$$

Общее решение сформулированной задачи основывается на методе интегральных преобразований Хенкеля и Лапласа [6]

$$T(r, z, t) - T_0 = \frac{bR^2}{4\alpha} \left[ 1 - \frac{r^2}{R^2} - 8 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \text{ch} \mu_n \frac{z}{R}}{\mu_n^3 J_1(\mu_n) \text{ch} \mu_n k} \right] + \frac{4bh^2}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \cos \lambda_n \frac{z}{h}}{\mu_n J_1(\mu_n) \lambda_m (\lambda_m^2 + \mu_n^2 k^2)} \times \exp[-(\lambda_m^2 + \mu_n^2 k^2) F \rho_h]. \quad (16)$$

В этом уравнении, кроме вышеуказанных, приняты обозначения:

$J_0, J_1$  - функции Бесселя нулевого и первого порядка первого рода;  $k = h/R$ ;  $F_0 = \alpha t/h$  - критерий Фурье;  $\mu_n$  - корни характеристического уравнения:

$$J_0(\mu) = 0 \quad (17)$$

С учетом (17) можно получить безразмерные зави-

симости для рассматриваемого процесса:

$$\frac{\theta}{PdFo} = f\left(k, \frac{r}{R}, \frac{z}{h}, Fo\right), \quad (18)$$

где  $Pd = \left(\frac{d\theta}{dFo}\right)_{max}$  - критерий Предводителя;

$$\theta = \frac{T(r, z, \tau) - T_0}{T_0} - \text{относительная избыточная}$$

температура в произвольной точке тела.

### Выводы

Пористые среды играют существенную роль не только в области технических устройств, но и в явлениях природы, биологии [4,7...13]. В статье приведено решение динамики тепломассообмена в адсорбционных тепловых насосах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пригожин И. Химическая термодинамика / И. Пригожин, Р. Дефэй // Новосибирск: Наука. - 1956.
2. Гиббс Дж. В. Термодинамические работы, М.; Л.: Гостехиздат, 1950, 492 с.
3. Вернов А. В. О термодинамике гетерогенных систем / А. В. Вернов, А. А. Лопашкин // Адсорбция в микропорах. - М. Наука. - 1983 - с. 11-19.
4. Morosuk T. Porous media for fouling problem in heat exchangers of refrigeration machines and pumps, on current issues on heat and mass transfer in porous media: Proceeding on the NATO Advanced Study Institute on Porous Media, 19-20 June 2003, Neptune Romania, 2003, P. 406-416.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности // - М.: Высш. шк., 1967, - 600 с.
6. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман, П. Гилли - М.: Мир, 1987, - 272 с.
7. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди // М.: Мир. - 2002 - 461 с.
8. A. Bejan. Entropy generation minimization in heat transfer. In: E. Sciubba, M. Moran (Eds) second Law Analysis of Energi systems: toward the 21st century. Proceeding of International Conferences ROMA, 1995. - P.363-372.
9. A. A. Mohamad. Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media. Part I: constant wall temperature, Int. J. Therm/ Sci. 42 (2003) - P. 385-395, 2003.
10. G. Lauriat, R. Ghafir. Forced convective transfer in porous media, in Handbook of Porous Media, K. Vafai, H. A. Hadim, Eds., Marcel Dekker, New York, NY, USA, 2000.
11. Poulidakos D. Kazmirczak M. Forced Convection in a Duct Partially Filled With a Porous Material, ASME J. Heat Transfer. 109 (1987) . P 653-662.
12. J. Y. Jang, J. L. Chen. Forced convection in a parallel plate channel partially filled with a high porosity medium. Int. Commun. Heat and Mass Transfer, vol. 19,2 (1992). P. 263-273.
13. J. L. Lage. A. Narasimhan. Porous media enhanced

forced convection fundamentals and applications. Handbook of Porous Media, K. Vafai. H. A. Hadim, Eds., Marcel

Dekker, New York, NY, USA, 2000.

## HEAT AND MASS TRANSFER IN THE DISTORTS OF ADSORPTION TRANSFORMERS

**B.Kh.Draganov<sup>1</sup>, A.A.Dolinsky<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, 15, Goroev Oborony str., Kiev, 03041, Ukraine.

<sup>2</sup> Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kiev, 03680, Ukraine.

Basic descriptions of the heterogeneous systems and process of adsorption are analysed. A design over of heat exchange is brought in porous environments. The production of entropy of the analysable phenomena is certain.

Porous media play an important role not only in the field of technical devices, but also in the phenomena of nature, biology [4,7 ... 13]. The article presents the solution of the dynamics of heat and mass transfer in adsorption heat pumps.

Ref.13.

**Key words:** adsorption, porous media, adsorption heat pump, Gibbs phase rule, Gibbs-Duhem equation, Hankel and Laplace transform, Bessel function, entropy production.

1. *Prigogine I.*, Chemical Thermodynamics. Prigogine I., Defej R. Novosibirsk: Nauka., 1956.(Rus)
2. *Gibbs, J.V.* Thermodynamic work, M.; L.: Gostehizdat, 1950, 492 p. (Rus.)
3. *Vernov A.* On the thermodynamics of heterogeneous systems. Vernov A, Lopashkin A. Adsorption in micropores. M.Nauka. – 1983 – P. 11-19. (Rus.)
4. *Morosuk T.* Porous medic for fouling problem in heat exchangers of refvigeration machines and pumps, on current issues on heat and mass transfer in porous media: Proceeding

on the NATO Advanced Study Institute on Porous Media, 19-20 June 2003, Neptune Romania, 2003, P, 406-416.

5. *Lykov A.* Theory of heat conduction. A.B.ЛЫКОВ. – М.: Vysshaja shkola , 1967, 600 p. (Rus.)

6. *Beckman G.* Thermal energy storage. G. Beckmann, P. Gilly – М.: Mir, 1987, 272p. (Rus.)

7. Prigogine I., Kondepudi F. Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures. Prigogine I., Kondepudi F. M.: Mir . – 2002 – 461 p. (Rus.)

8. *A.Bejan.* Entropy generation minimization in heat transfer. In: E.Sciubba. M.Moran (Eds) second Law Analysis of Energi systems: toward the 21st century. Proceeding of International Conferences ROMA, 1995. – P.363-372.

9. *A. A. Mohamad.* Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media. Part I: constant wall temperature, Int. J. Therm. Sci. 42 (2003) – P. 385–395, 2003.

10. *G. Lauriat. R. Ghafir.* Forced convective transfer in porous media, in Handbook of Porous Media, K. Vafai, H. A. Hadim, Eds., Marcel Dekker, New York, NY, USA, 2000.

11. Poulidakos D. Kazmirczak M. Forced Convection in a Duct Partially Filled With a Porous Material, ASME J. Heat Transfer. 109 (1987) . P 653-662.

12. *J. Y. Jang, J. L. Chen.* Forced convection in a parallel plate channel partially filled with a high porosity medium. Int. Commun. Heat and Mass Transfer, vol. 19,2 (1992). P. 263–273.

13. *J. L. Lage. A. Narasimhan.* Porous media enhanced forced convection fundamentals and applications. Handbook of Porous Media, K. Vafai. H. A. Hadim, Eds., Marcel Dekker, New York, NY, USA, 2000.

Получено 24.10.2017

Received 24.10.2017