

**МОДЕЛИРАНЕ НА КОЛОНЕН АПАРАТ ЗА ИЗСУШАВАНЕ НА ВЪЗДУХ**

Петя Попова, Христо Бояджиев

**MODELING OF MOISTURE ADSORPTION IN COLUMN APPARATUSES**

Petya Popova, Christo Boyadjiev

**ABSTRACT:** This paper presents a mathematical model which describes process of moisture transfer from the adsorbent bed and air filtrated through the bed. The model is applied to describe evolution of vapor concentration at the exit of experimental unit for regenerating moisture in ventilation systems, which has recently been suggested, build and tested. Sorption equilibrium of water vapor on the new sorbent has been studied to be used as input parameter in the model. Good agreement between experimental and calculation data demonstrated that the model adequately reflects main physical and chemical features of the regeneration processes. Hence, it can be used for modeling a scale-up effect and for magnification of the unit from laboratory to larger size.

**Key words:** mathematical modeling, adsorption, mass transfer, parameter identification

**Въведение**

Значителна част от територията на Русия и практически цял Сибир се намират в зона със студен климат, където са необходими големи количества топлина за отоплението на жилищни и промишлени помещения.

В страните със студен климат голямата разлика между вътрешните и външните температури води до големи загуби на топлина във вентилационните системи, замръзване на влажния въздух на изход от тези системи и намаляване на влажността на закрито. Решението на тези проблеми е свързано с използването на топлия въздух, напускащ помещенията, за затопляне на постъпващия хладен въздух. За това обикновено се използват топлообменни устройства от регенеративен тип. Предложеният нов подход за регенерация на влага във вентилационни системи е тестван в лабораторни условия [1-3]. Влажният въздух преминава през слой адсорбент  $\text{CaCl}_2$ , поглъщащ съдържащата се във въздуха влага.

Много модели се използват за описание на масопрееноса между фиксиран слой твърд адсорбент и потока влажен въздух, който се филтрира през този слой [4, 5]. Процесът на пренос е описан посредством уравнението на конвекция-дифузия, съпроводен с обемна реакция.

**Математичен модел**

Математичното описание на процеса на масопрееноса в газовата фаза е:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial z} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{k_1}{\varepsilon} \left[ c \left( 1 - \frac{c_S}{c_S^{max}} \right) - kc_S \right],$$

$$t = 0, \quad c = c_0;$$

$$z = 0, \quad c = c_0, \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0.$$
(1)

Промяната на концентрацията на влагата, свързана с адсорбента се изчислява от уравнението:

$$\frac{\partial c_S}{\partial t} = \frac{k_1}{1-\varepsilon} \left[ c \left( 1 - \frac{c_S}{c_S^{max}} \right) - kc_S \right], \quad (2)$$

$$t = 0, \quad c_S = c_S^0,$$

където  $u$  е разпределението на скоростта,  $c$ -концентрацията на влага в газовата фаза,  $D$ -коэффициент на дифузия,  $c_0$ -начална концентрация на влагата във влажния въздух,  $c_S$ -концентрацията на влагата, свързана с адсорбента,  $c_S^{max}$ -максималната концентрация (насищане),  $k$ -скоростен коэффициент на обемната реакция,  $\varepsilon$ -задържащата способност в адсорбционната колона.

Моделните уравнения (1, 2) се решават за времеви интервал  $[t_0 \leq t \leq t_{critical} = 5.83 \text{ min}]$ .

За идентификацията на параметрите в модела се използва методът на най-малките квадрати. Задачата ще бъде решена в безизмерен вид, използвайки характеристичните мащаби на процеса:

$$t = t_0 T, \quad c = c_{max} C, \quad c_S = c_S^{max} C_S, \quad z = lZ. \quad (3)$$

Заместването на уравнение (3) в моделните уравнения (1, 2) води до изразите:

$$\frac{\partial C}{\partial T} + \frac{ut_0}{l} \frac{\partial C}{\partial Z} = Fo \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{k_1 t_0}{\varepsilon} C + \frac{k_1 k t_0}{\varepsilon} \frac{c_S^{max}}{c_S^{max}} C_S, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_S}{\partial T} = \frac{k_1 t_0}{1-\varepsilon} \frac{c_S^{max}}{c_S^{max}} C - \frac{k_1 k t_0}{1-\varepsilon} C_S, \quad (5)$$

$$T = 0, \quad C = 1, \quad C_S = 0;$$

$$Z = 0, \quad C = 1, \quad \frac{\partial C}{\partial Z} = 0, \quad C_S = 0, \quad (6)$$

Където:

$$Fo = \frac{Dt_0}{l^2}. \quad (7)$$

При редица бавни процеси характеристичното време  $t_0$  е голямо, и ако се раздели уравнение (4) на  $\frac{ut_0}{l} \Rightarrow \frac{\partial C}{\partial T} \approx 0$ , т.е. процеса се приема за стационарен. Концентрацията на влагата, свързана с адсорбента ( $C_S$ ) зависи от времето на процеса, поради което концентрацията на влагата в газовата фаза ( $C$ ) също е функция на времето-времето се явява параметър в уравнение (4).

$$\frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{k_1 l}{u\varepsilon} C + \frac{k_1 k l}{u\varepsilon} \frac{c_S^{max}}{c_S^{max}} C_S, \quad (8)$$

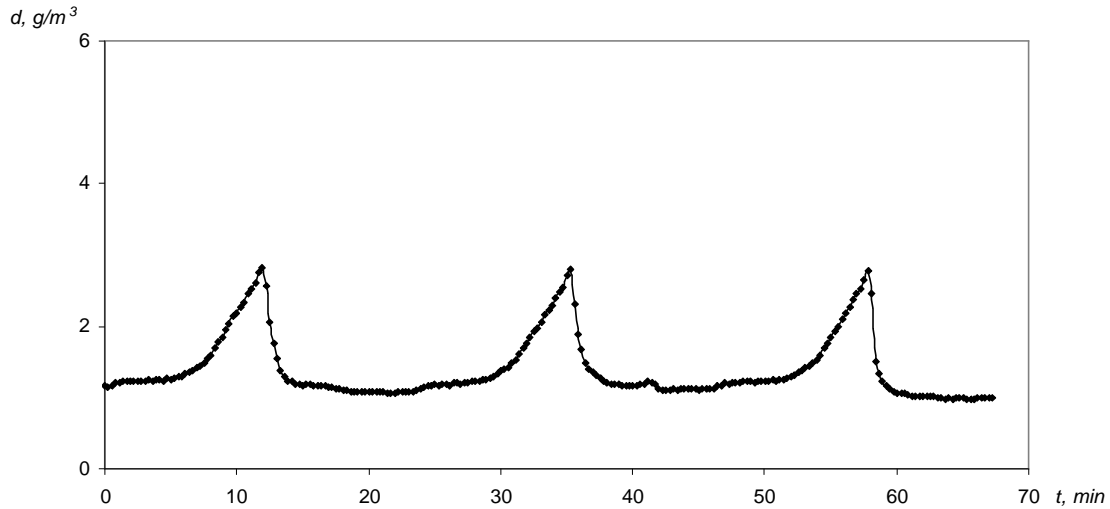
$$\frac{\partial C_S}{\partial T} = \frac{k_1 t_0}{1-\varepsilon} \frac{c_S^{max}}{c_S^{max}} C - \frac{k_1 k t_0}{1-\varepsilon} C_S, \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 T = 0, \quad C_S = 0; \\
 Z = 0, \quad C = 1, \quad \frac{\partial C}{\partial Z} = 0, \quad C_S = 0,
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Където:

$$Pe = \frac{ul}{D}
 \tag{11}$$

Параметричната идентификационна задача (8-10) е решена на базата на реални експериментални данни (Фиг.1) [2].



**Фиг. 1** Изменението на абсолютната влажност на въздуха  $d(g/m^3)$  с времето  $t (min)$ .

За определяне на параметрите в модела е необходимо да се въведе функцията на най-малките квадрати:

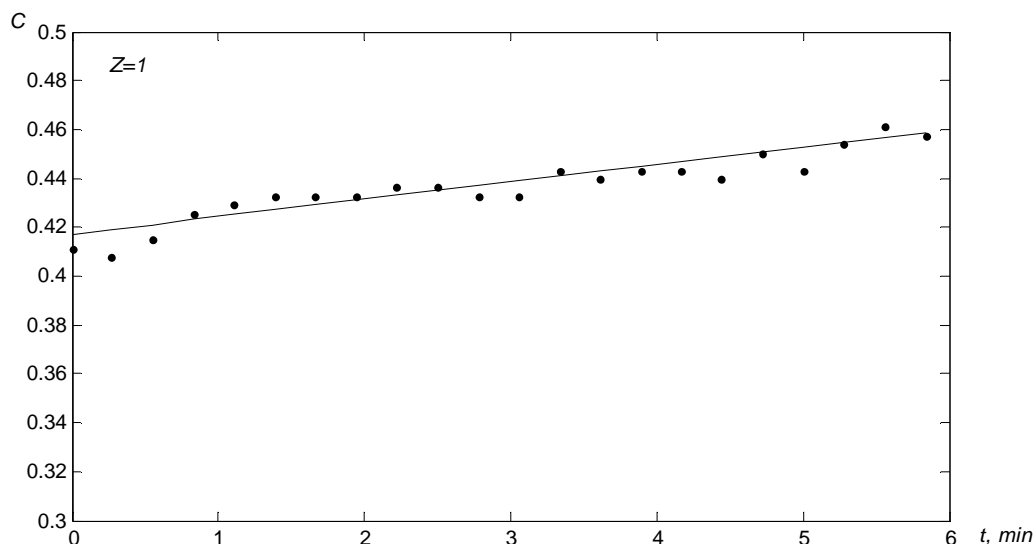
$$F = \sum_{i=1}^N [C(t_i) - C_{exp}(t_i)]^2,
 \tag{12}$$

За изчисляване на параметрите в модела е необходимо да се минимизира функцията (12), посредством процедурата *fminsearch* на MATLAB 7.5.

Получените резултати са:

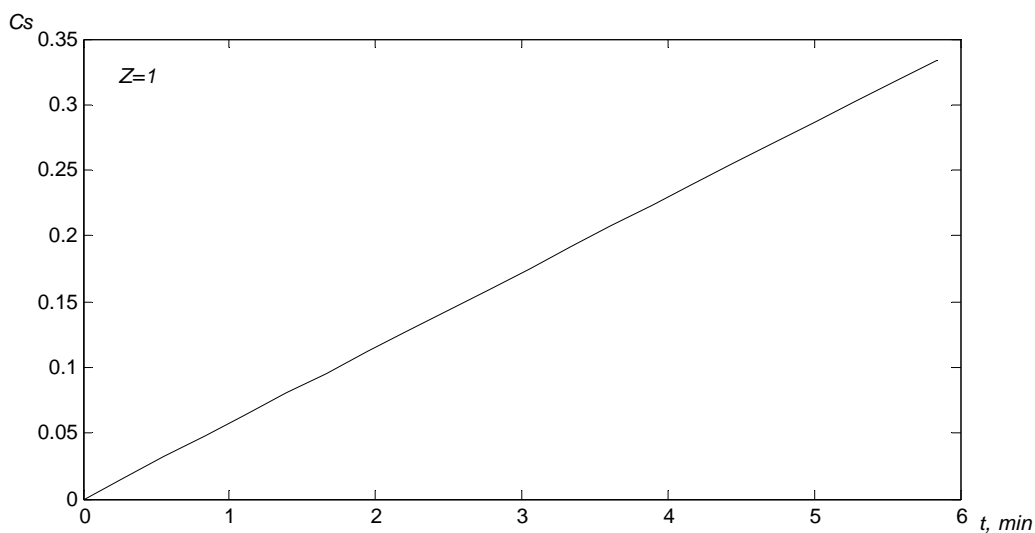
$$k_1 = 0.0084 s^{-1}, \quad k = 0.0388, \quad \varepsilon = 0.0098 \frac{m^3}{m^3}, \quad F = 2.5379 \cdot 10^{-5}
 \tag{13}$$

Сравнението на изчислените и експерименталните стойности за изменението на концентрацията на влагата в газовата фаза е показано на Фиг. 2.

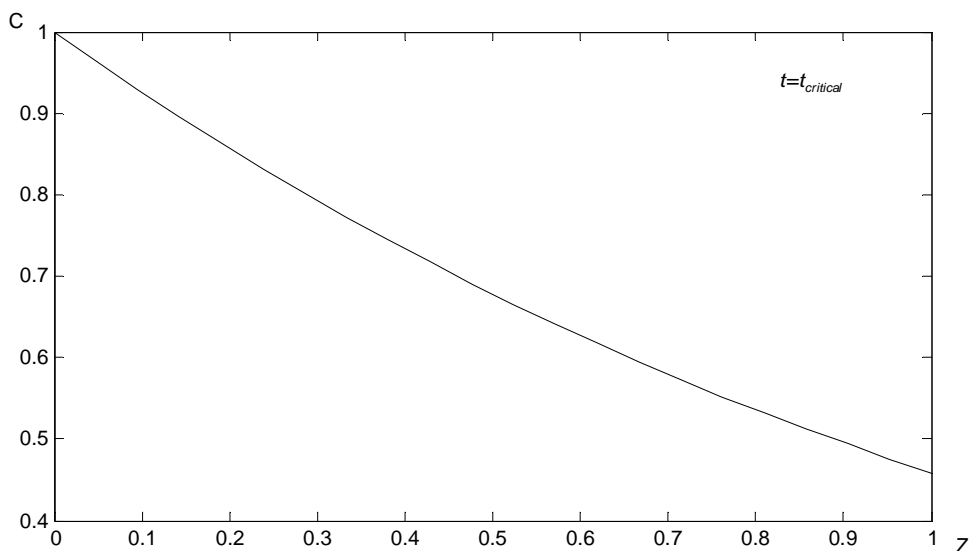


**Фиг. 2.** Сравняване на изчислените стойности и експерименталните данни за изменението на концентрацията на влагата в газовата фаза в безизмерен вид ( $C$ )

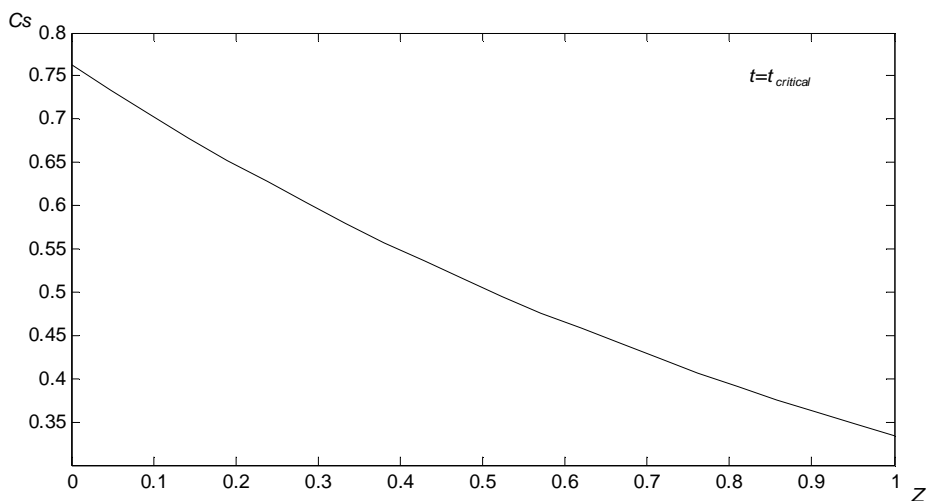
От моделните уравнения (4-6), с вече определените стойности на параметрите, може да се изчисли изменението на концентрацията на влагата, свързана с адсорбента  $\text{CaCl}_2$  в твърдата фаза с времето  $C_S = f(t)_{Z=1}$  (Фиг.3), изменението на концентрацията на влагата в газовата фаза  $C = f(Z)_{t=t_{critical}}$  и концентрацията на влагата, свързана с адсорбента в твърдата фаза  $C_S = f(Z)_{t=t_{critical}}$  като функция от височината на колоната (Фиг. 4, 5).



**Фиг. 3** Изменение на концентрацията на влагата, свързана с адсорбента  $\text{CaCl}_2$  в твърдата фаза като функция от времето  $C_S = f(t)_{Z=1}$



**Фиг. 4** Изменение на концентрацията на влагата в газовата фаза като функция от височината на колоната  $C = f(Z)_{t=t_{critical}}$



**Фиг. 5** Изменение на концентрацията на влагата, свързана с адсорбента в твърдата фаза като функция от височината на колоната  $C_s = f(Z)_{t=t_{critical}}$

### Заклучение

Методът е тестван при моделирането на процеса за изсушаване на влажен въздух в колонен апарат. Получените резултати от моделирането показват добро съответствие с наличните експериментални данни.

От моделните уравнения могат да се изчислят зависимостите на промяната концентрацията на влагата, свързана с адсорбента  $\text{CaCl}_2$  в твърдата фаза като функция от времето  $C_s = f(t)_{Z=1}$  и височината на колоната  $C_s = f(Z)_{t=t_{critical}}$ , и промяната на концентрацията на влагата в газовата фаза  $C = f(Z)_{t=t_{critical}}$  като функция от височината на колоната.

Следващият етап на моделирането е решаването на уравненията в модела за целия времеви период на адсорбционния процес и определянето на стойностите на параметрите.

### Използвани означения

$c$	концентрация на влагата в газовата фаза, [kmol/m <sup>3</sup> ]
$c_S$	концентрация на влагата, свързана с адсорбента в твърдата фаза, [kmol/m <sup>3</sup> ]
$c_0$	входната концентрация на влагата в газовата фаза, [kmol/m <sup>3</sup> ]
$c_S^0$	начална концентрация на влагата, свързана с адсорбента в твърдата фаза, [kmol/m <sup>3</sup> ]
$k$	равновесна константа
$k_1$	коефициент на масопренасяне, [s <sup>-1</sup> ]
$u$	разпределение на скоростта в колоната, [m/s]
$D$	коефициент на дифузия в газовата фаза, [m <sup>2</sup> /s]
$l$	височина на колоната, [m]
$\varepsilon$	задържача способност на газа в адсорбционната колона, [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$t$	време, [s]
$N$	брой на експерименталните данни
$F$	функция на най-малките квадрати
$Fo$	критерий на Фурие
$Pe$	критерий на Пекле

### БЛАГОДАРНОСТИ

Това изследване беше осъществено благодарение на финансовата подкрепа на Европейски социален фонд и Оперативна програма "Развитие на човешките ресурси" 2007-2013, по проект "Програми и инструменти за повишаване на научния потенциал на докторанти, пост-докторанти и млади учени в областта на химичната и биохимичната технология и опазването на околната среда", изпълняван съвместно от Институт по инженерна химия при БАН – София и Университет «Проф. Д-р Асен Златаров» - Бургас, по договор №BG051PO001-3.3.04/ 30 /28.08.2009.

### Литература

1. **Aristov, Yu. I., I.S.Mezentsev, V.A. Mukhin**, New approach to regenerating heat and moisture in ventilation systems. 1. Laboratory prototype, *J. Engineering and Thermophysics*, **79**, pp. 143-150 (2006)
2. **Aristov, Yu. I., I.S.Mezentsev, V.A. Mukhin**, New approach to regenerating heat and moisture in ventilation systems. 1. Prototype of real unit, *J. Engineering and Thermophysics*, **79**, pp. 151-157 (2006)
3. **Aristov, Yu. I., I.S.Mezentsev, V.A. Mukhin, Chr. Boyadjiev, M. Doichinova, P. Popova**, New approach to regenerating heat and moisture in ventilation systems: experiment, *11<sup>th</sup> Int. Workshop on Transport Phenomena in Two-phase Flow, Bulgaria*, Sept. 1-5, pp. 77-84 (2006)
4. **Close, D. J., P.J. Banks**, *Chem. Eng. Sci.*, **27**, pp. 1155-1167 (1972)
5. **Ruthven, D. M., S. Farooq, K.S. Knaebel**, Pressure Swing Adsorption, N.Y. (1994).
6. **Boyadjiev, Chr.**, Diffusion models and scale-up, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **49**, pp. 796-799 (2006)
7. **Boyadjiev, Chr.**, Reversible gas absorption, *Hung. J. Ind. Chem.*, **13**, pp. 163-168 (1965)

Петя Попова, e-mail: [petyabs@yahoo.com](mailto:petyabs@yahoo.com)

Христо Бояджиев, e-mail: [chboyadj@bas.bg](mailto:chboyadj@bas.bg)

Българска Академия на Науките, Институт по инженерна химия  
Ул. „Стефан Ангелов” бл. 103, 1113 София, България