

Sergey Anisimov, Piotr Kowalski

Matematyczny model procesów wymiany ciepła i masy w przeciwprądowym osuszaczu powietrza

W ostatnim czasie ma miejsce duże zainteresowanie solar-nymi systemami klimatyzacyjnymi, w których jednym z podstawowych elementów jest obrotowy osuszacz powietrza. Z tego względu zasadną staje się analiza procesów wymiany ciepła i masy zachodzących w tym urządzeniu oraz dostosowania jego pracy i właściwości do zastosowania w solarnych układach klimatyzacyjnych. W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele modeli wymiany ciepła i masy w regeneracyjnych adsorpcyjnych osuszaczach powietrza. Jednak podstawę do ich opracowania stanowi założenie, że siłą napędową procesu przenoszenia wilgoci jest różnica ciśnień cząstkowych lub różnica zawartości wilgoci.

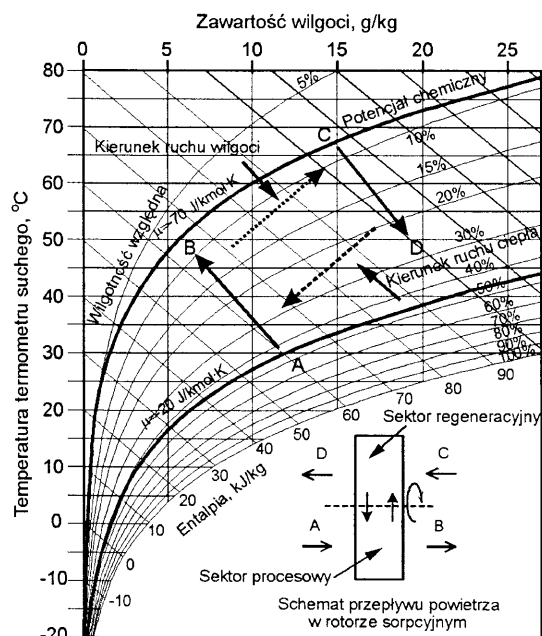
W przedstawionym w niniejszej pracy modelu do analizy tego problemu zastosowano potencjał chemiczny. Strumień wilgoci w higroskopijnym materiale wypełnienia transportowany jest od powietrza osuszanego, o mniejszym ciśnieniu cząstkowym pary wodnej, do powietrza regeneracyjnego o większym ciśnieniu cząstkowym. Fakt ten nie pozwala na poprawny matematyczny opis procesów wymiany ciepła i masy w osuszaczu, przy wykorzystaniu jako potencjału przenoszenia wilgoci różnicy ciśnień cząstkowych lub zawartości wilgoci. Sprzeczność ta nie występuje natomiast w przypadku zastosowania potencjału chemicznego [1], bowiem jego rozkład kształtuje się tak, że wymiana ciepła i masy przebiega zgodnie z dodatnią różnicą potencjałów chemicznych (rys. 1).

Model matematyczny

Przy konstruowaniu matematycznych modeli stosowanych do opisu systemów klimatyzacyjnych stosuje się różne podejścia. Najbardziej ściśle zachodzące w nich procesy opisywane są za pomocą równań różniczkowych, opierających się na prawach przenoszenia ciepła i masy. W praktyce wykorzystywane są trzy podstawowe modele skonstruowane na podstawie równań [2]:

- Reynoldsa,
- warstwy przyściennej,
- jednowymiarowego przenoszenia.

Zastosowanie równań Reynoldsa oraz warstwy przyściennej pozwala na otrzymanie szczegółowej informacji o temperaturowych i wilgotnościowych parametrach w każdym obszarze złożonego układu. Jednakże ich opis w postaci nieliniowych równań różniczkowych stanowi trudność wynikającą z konieczności określenia turbulentnych charakterystyk



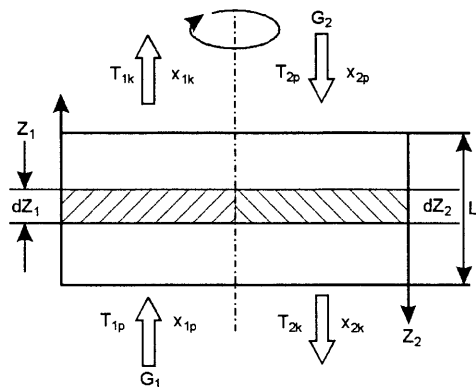
Rys. 1. Przemiany parametrów termodynamicznych powietrza w obrotowym osuszaczu powietrza

Fig. 1. Changes in the thermodynamic parameters of air in the rotary dehumidifier

przepływu. Dlatego często wymagają one wprowadzenia prostych warunków brzegowych oraz wielu założeń upraszczających [2]. W przypadku braku konieczności tak dokładnych informacji z powodzeniem można zastosować model przenoszenia jednowymiarowego (α -model), który ma powszechne zastosowanie w tego typu zagadnieniach [2]. W α -modelu zakłada się, że w przekroju poprzecznym kanału prędkość, temperatura oraz zawartość wilgoci są równe średnim tych wartości. Właśnie model tego typu zaprezentowano w niniejszej pracy. Główne założenia użyte przy tworzeniu modelu były następujące:

- strumień powietrza stanowi idealną mieszkankę gazową,
- siłą napędową procesów przenoszenia masy stanowi potencjał chemiczny ($\mu=RT\ln\phi$),
- płaszczyznę wypełnienia przyjmuje się jako umownie cienkie kapilarno-porowate ciało,
- wzdłużna dyfuzja molekularna pary wodnej w powietrzu oraz przenoszenie ciepła w wyniku przewodzenia są nieistotne.

Zgodnie z przyjętymi założeniami, opracowano matematyczny model wymiany ciepła i masy w kanałach wypełnienia sorpcyjnego (rys. 2). Składa się on z równań różniczkowych bilansów cieplnych i masowych strumieni powietrza osuszanego i regeneracyjnego oraz wypełnienia w postaci (1)–(4):



Rys. 2. Schemat obliczeniowy modelu
Fig. 2. Scheme of calculations for the model

$$\frac{\partial T_j}{\partial \tau} = Ho_j \left[NTU_j (T_{wj} - T_j) - \frac{\partial T_j}{\partial Z_j} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mu_j}{\partial \tau} = Ho_j \left[(NTU'_{\mu})_j (\mu_{wj} - \mu_j) + \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_{x_j} NTU_j (T_{wj} - T_j) - \frac{\partial \mu_j}{\partial Z_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_{wj}}{\partial \tau} = NTU_{wj} (T_j - T_{wj}) + q_{sp} \left(\frac{c'_{\mu}}{c} \right)_{wj} (NTU'_{\mu})_{wj} (\mu_j - \mu_{wj}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mu_{wj}}{\partial \tau} = (NTU'_{\mu})_{wj} (\mu_j - \mu_{wj}) \quad (4)$$

w których:

$\bar{\tau} = \tau / \tau_0$ – bezwymiarowa współrzędna czasowa

$Z = Z/L$ – bezwymiarowa współrzędna w kierunku ruchu strumienia powietrza

$j=1, 2$ ($j=1$ – strumień powietrza osuszanego; $j=2$ – strumień powietrza regeneracyjnego)

W układzie równań (1)–(4) wprowadzono następujące bezwymiarowe kompleksy:

$$NTU = (\alpha F) / (G c_p)$$

$$NTU_w = (\alpha F \tau_0) / (M_w c_w)$$

$$Ho = (w \tau_0) / L$$

$$NTU'_{\mu} = (\beta_{\mu} F_{por}) / (G c'_{\mu})$$

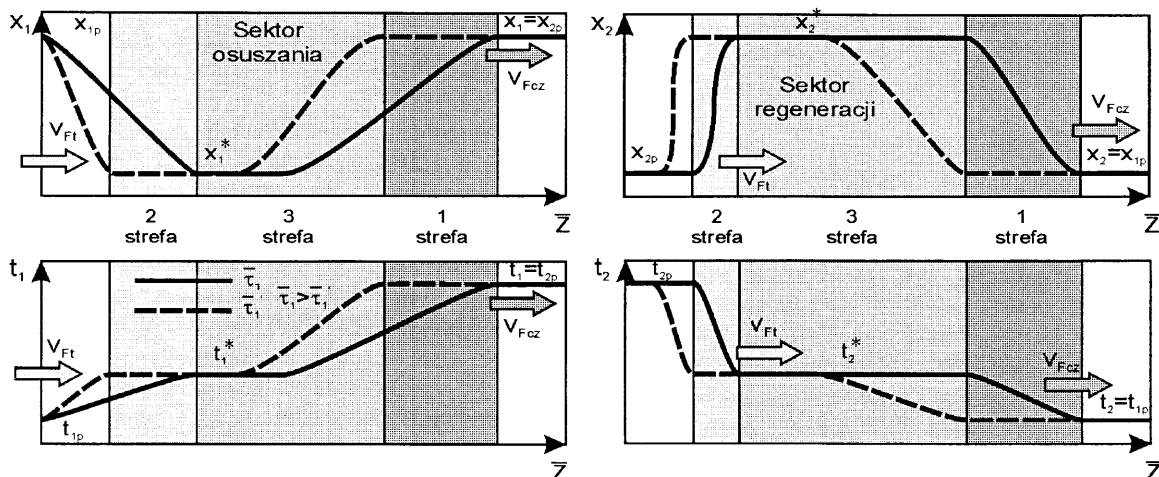
$$(NTU'_{\mu})_w = (\beta_{\mu} F_{por} \tau_0) / [M_w (c'_{\mu})_w]$$

a także warunki początkowe, warunki ustalające parametry termodynamiczne powietrza na wejściu do osuszacza oraz warunki przełączenia.

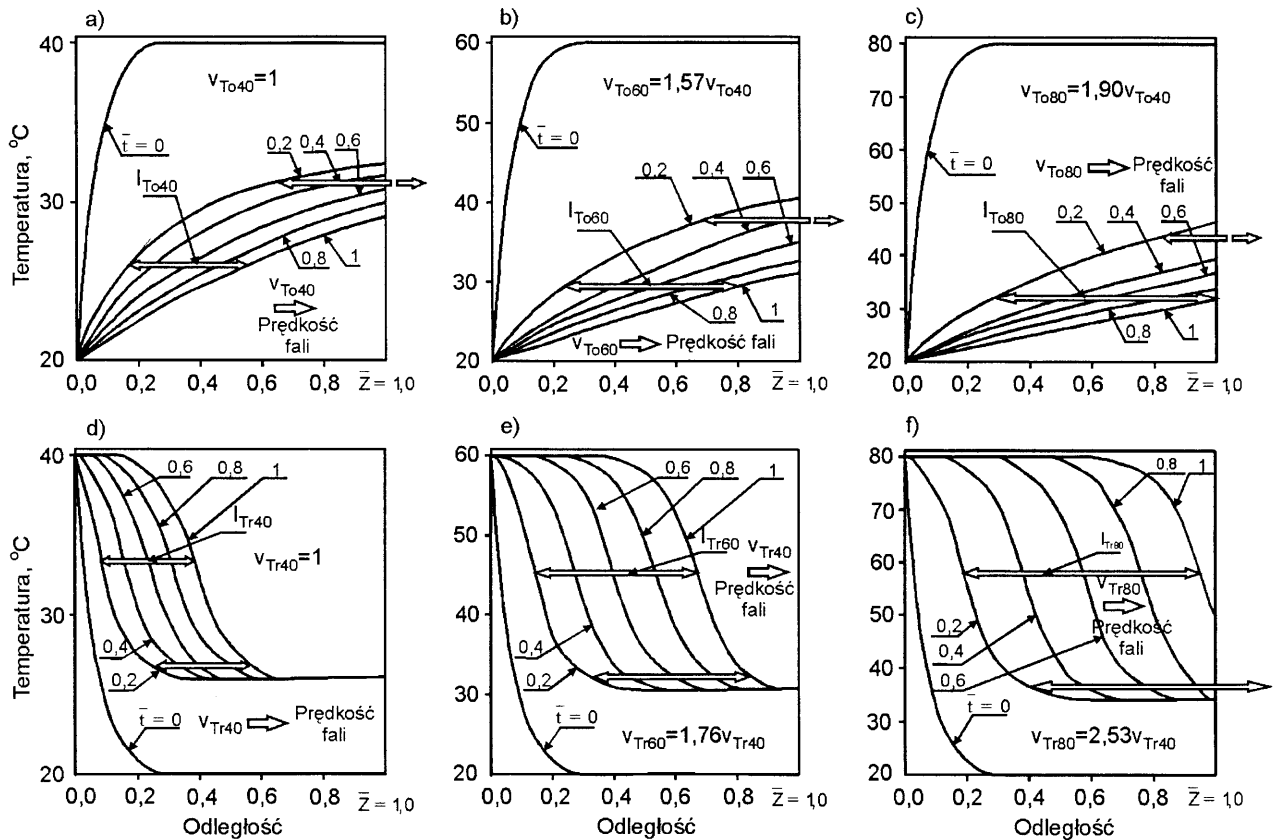
Przykładowe wyniki obliczeń

Na podstawie przeprowadzonych wielowariantowych badań numerycznych wykazano, że wymiana ciepła i masy w badanym wymienniku charakteryzuje się skomplikowanymi i różnorodnymi polami temperatur i wilgotności, które zależą od wzajemnego oddziaływania czynników termodynamicznych, hydrodynamicznych i innych. Wykazano, że w obrotowym osuszaczu powietrza tworzy się obraz tzw. kombinowanej fali [3,4]. Powstaje on w kanałach higroskopijnego wypełnienia, gdzie formują się dwie quasi-ustalone temperatury i wilgotnościowe fale poruszające się wspólnie w kierunku przepływu powietrza, które tworzą dwie strefy aktywnej wymiany ciepła i masy – czołową i tylną (rys. 3). Czołowa fala przemieszcza się ze znacznie większą prędkością od tylnej ($v_{Fcz} \approx 20 v_{Fi}$) dzięki czemu powstaje strefa przejściowa, w której powietrze i wypełnienie znajdują się w stanie równowagi w temperaturze t^* i przy zawartości wilgoci x^* .

Najbardziej wyraźna cecha kombinowanej fali uwidacznia się przy wolnych obrotach rotora. W tym przypadku wartości parametrów termodynamicznych wypełnienia na końcu osuszania lub regeneracji zbliżają się do warunków ustalonych, odpowiadających temperaturze i wilgotności na wejściu do osuszacza. Na prędkość przemieszczania fal mają wpływ temperatury powietrza osuszanego oraz regeneracyjnego. Jak pokazano na rysunku 4, obrazującym fragmenty fal wygenerowane przy pomocy programu stworzonego na podstawie wyżej opisanego modelu, prędkości fal w obszarze osuszania oraz regeneracji były różne. Uwidoczniła się również tendencja wzrostu ich prędkości wraz ze wzrostem temperatury powietrza regeneracyjnego. Wystąpiły także różnice między prędkościami fal w sektorach regeneracyjnym i procesowym. Fakt ten ma istotny wpływ przy określaniu parametrów pracy oraz rozwiązań konstrukcyjnych osuszacza powietrza. Przykładowo, rozpatrując zastosowanie obrotowych osuszaczy powietrza do instalacji niskotemperaturowych, np. solarnych systemów klimatyzacyjnych, gdzie dostępne temperatury regeneracji materiału wypełnienia kształtują się w zakresie $60+70$ °C, należy zmniejszyć prędkość obrotową rotora oraz przyjąć zbliżoną wielkość obu sektorów w stosunku do instalacji wysokotemperaturowych. Ma to związek w pierwszym przypadku z koniecznym dłuższym czasem na przejście tylnej fali temperaturowej w obu sektorach ($v_{T40} < v_{T60} < v_{T80}$) (rys. 4). Jak pokazano na rysunkach 3 i 4, o stosunku wielkości sektorów regeneracyjnego i osuszającego decydują prędkości przemieszczania się tylnych fal.



Rys. 3. Strefy wymiany ciepła i masy w higroskopijnym wypełnieniu obrotowego osuszacza powietrza
Fig. 3. Heat and mass transfer zones arising in rotary dehumidifier



Rys. 4. Profile temperatur tylnej fali wzdłuż kanałów wypełnienia w sektorach osuszania (a,b,c) i regeneracji (d,e,f) przy $NTU=15$, $W=NTU_w/NTU$ i $x_{1p}=10$ g/kg (a,d – $t_{1p}=20$ °C, $t_{2p}=40$ °C; b,e – $t_{1p}=20$ °C, $t_{2p}=60$ °C; c,f – $t_{1p}=20$ °C, $t_{2p}=80$ °C)
 Fig. 4. Variations in rear wave temperature with time along the matrix channels in the drying (a,b,c) and regeneration (d,e,f) sectors for the following parameters: $NTU=15$, $W=NTU_w/NTU$, $x_{1p}=10$ g/kg (a,d: $t_{1p}=20$ °C, $t_{2p}=40$ °C; b,e: $t_{1p}=20$ °C, $t_{2p}=60$ °C; c,f: $t_{1p}=20$ °C, $t_{2p}=80$ °C)

Wnioski

♦ Opracowano i zrealizowano numeryczną metodę obliczania podstawowych parametrów procesów wymiany ciepła i masy w obrotowym osuszaczu powietrza.

♦ Wykazano, że w obrotowym osuszaczu powietrza tworzy się obraz tzw. kombinowanej fali, charakteryzujący się powstaniem dwóch stref aktywnej wymiany ciepła i masy.

♦ Analiza procesów zachodzących w strefach aktywnej wymiany ciepła i masy umożliwia oszacowanie zakresu zmian optymalnych roboczych parametrów osuszacza, jak również ocenę możliwości jego racjonalnego wykorzystania.

LITERATURA

1. S.M. ANISIMOV, V.F. VASILJEV: Issledovanie processov teplo-masoobmena v regenerativnykh osushitelnykh vozdukhha sistem kondicionirovanya vozdukhha. Chast I. Inzhenernye sistemy. AWOK-Severo-Zapad, 2004, nr 1, ss. 49–53.
2. V.N. BOGOSLOVSKI, M.YA. POZ: Teplofizika apparatov utiliacii sistem otopeniya, vientilacii i kondicionirovanya vozdukhha. M. Stroizdat, 1983, s. 320.
3. N.W. KIELCEW: Podstawy techniki adsorpcyjnej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
4. M.L. PADEREWSKI: Procesy adsorpcyjne w inżynierii chemicznej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.

Anisimov, S., Kowalski, P. **Mathematical Model of Heat and Mass Transfer in an Counterflow Air Dehumidifier.** *Ochrona Srodowiska* 2008, Vol. 30, No. 3, pp. 49–51.

Abstract: The process of coupled heat and mass transfer that occurs in a rotary dehumidifier used in air conditioning systems was made subject to analysis, and the results obtained (the mass transfer process occurs in the direction opposite to the positive water vapor partial pressure difference) have justified the application of the chemical potential to the description of the nonsteady-state processes of mass transfer in the dehumidifier matrix. It has been demonstrated that an image of the so-called combined wave arises in the rotary dehumidifier of air, and that the image

is characterized by the formation of two active zones of heat and mass transfer. Within the framework of the assumptions made, the relevant mathematical model (α -model) was developed and substantiated, and the calculated values of the thermal and adsorption waves obtained with the model were presented. It has been found that the analysis of the processes arising in the active zones of heat and mass transfer made it possible to assess the range of changes in the optimal operating parameters of the dehumidifier, as well as the range of rational uses where the dehumidifier could be applied.

Keywords: Heat and mass transfer, modeling, dehumidifier.