WYZNACZANIE OBJĘTOŚCIOWEGO WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA W SUSZARCE BĘBNOWEJ

S. PABIS, S. P. GADAJ, R. SUPRUNOWICZ — Polska

Proces nagrzewania ziarnistego materiału w bębnie suszarki bębnowej charakteryzowany jest przez objętościowy współczynnik przejmowania ciepła $(a\alpha)$, który może być odniesiony do jednostki objętości bębna $(a\alpha)_b$ lub do jednostki objętości materiału znajdującego się w bębnie $(a\alpha)_m$. Między tymi współczynnikami zachodzi związek

$$(a\alpha)_b = \varepsilon(a\alpha)_m,$$

gdzie ε — stopień wypełnienia bębna, przy czym

$$\varepsilon = \frac{V_m}{V_b},$$

V_m — objętość materiału w bębnie,
V_b — objętość bębna.

Oprócz wymiany ciepła między czynnikiem a materiałem zachodzi również proces oddawania ciepła na zewnątrz przez powierzchnię bębna. Proces ten scharakteryzowany jest współczynnikami przenikania ciepła k (dla czynnika) i k_m (dla materiału).

Opisanie procesu wymiany ciepła w bębnie układem równań różniczkowych i rozwiązanie tego układu pozwoliło na znalezienie przebiegu temperatur materiału i czynnika wzdłuż długości bębna w zależności od współczynników $(a\alpha)$, k, k_m. Porównanie znalezionych na drodze teoretycznej przebiegów temperatur z wartościami uzyskanymi z eksperymentów pozwala wyznaczyć współczynniki charakteryzujące wymianę ciepła.

W pracy [2] zostało podane następujące rozwiązanie ogólne układu równań opisujących wymianę ciepła w bębnie suszarki

$$t = R_1 C_1 e^{r_1 x} + R_2 C_2 e^{r_2 x} + t_0, \tag{1}$$

$$t_m = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x} + t_0, \tag{2}$$

gdzie:
$t = t(x)$ — temperatura czynnika,
$t_m = t_m(x)$ — temperatura materiału,
t_0 — temperatura otoczenia,
x — odległość od początku bębna,
C_1, C_2 — stałe całkowania;

$$r_{1,2} = \frac{1}{2}\left[-(A+B+C+D) \mp \sqrt{(A+B-C-D)^2+4AC}\right], \tag{3}$$

$$R_1 = \frac{C+D+r_1}{C}, \tag{4}$$

$$R_2 = \frac{C+D+r_2}{C}, \tag{5}$$

$$A = \frac{\pi d_b^2}{4W}(a\alpha)_b, \tag{6}$$

$$B = \frac{\pi d_b}{W} k, \tag{7}$$

$$C = \frac{\pi d_b^2}{4W_m}(a\alpha)_b, \tag{8}$$

$$D = \frac{\pi d_b}{W_m} k_m, \tag{9}$$

d_b — wewnętrzna średnica bębna,
W — równoważnik wodny dla czynnika,
W_m — równoważnik wodny dla materiału.

Jeżeli do równań (1) i (2) podstawi się warunki brzegowe

$$x = 0, \qquad t_m = t_0,$$
$$x = x_{II}, \qquad t_m = t_{mII},$$

to w wyniku otrzymuje się

$$C_1 = -C_2$$

oraz

$$C_1 = \frac{t_{mII}-t_0}{e^{r_1 x_{II}} - e^{r_2 x_{II}}}. \tag{10}$$

Rozwiązania (1) i (2) zostały uzyskane przy założeniu stałej wartości współczynnika $(a\alpha)_b$.

Podczas pracy suszarki część ciepła jest odprowadzana poprzez płaszcz bębna do otoczenia. Ciepło to jest oddawane zarówno przez czynnik, jak i przez materiał.

Ilość ciepła, którą czynnik oddaje do otoczenia przez jednostkę powierzchni bębna, określana jest wzorem

$$q = k \cdot \Delta t,$$

gdzie:
k — współczynnik przenikania ciepła między czynnikiem a otoczeniem określający, jaka ilość ciepła odprowadzana jest w ciągu jednostki czasu przez jednostkę powierzchni bębna przy różnicy temperatur 1°C,
$\Delta t = t - t_0$.

Analogicznie ciepło oddawane do otoczenia przez materiał wyraża się wzorem

$$q_m = k_m \cdot \Delta t_m,$$

gdzie:
k_m — współczynnik przenikania ciepła między materiałem a otoczeniem,
$\Delta t_m = t_m - t_0$.

Proces oddawania ciepła przez czynnik przebiega następująco: przepływający wewnątrz bębna czynnik oddaje ciepło przez konwekcję do ścianki, a ścianka przewodzi ciepło i przekazuje przez konwekcję do otoczenia. Współczynnik k charakteryzujący ten proces określony jest wzorem

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{1}{\alpha_0}, \tag{11}$$

gdzie:
α — współczynnik przejmowania ciepła między czynnikiem a ścianką; sposób obliczania tego współczynnika zależny jest od tego, czy przepływ wewnątrz bębna jest laminarny, czy burzliwy;
δ_b — grubość ścianki bębna;
λ_b — przewodność cieplna materiału, z którego wykonany jest bęben;
α_0 — współczynnik przejmowania ciepła między ścianką a otoczeniem (na zewnątrz bębna); jeżeli bęben się nie obraca, należy obliczyć ten współczynnik jak dla konwekcji swobodnej, natomiast w przypadku ruchu bębna należy wziąć pod uwagę względny opływ powietrza wokół bębna.

Grubość ścianki bębna jest niewielka, a materiał, z którego wykonany jest bęben (metal) dobrze przewodzi ciepło, wobec tego czynnik $\frac{\delta_b}{\lambda_b}$ we wzorze (11) może być z reguły pominięty. Przejmowanie ciepła wewnątrz bębna jest intensywniejsze niż na zewnątrz, więc na wartość k wpływa głównie współczynnik przejmowania ciepła między ścianką bębna a otoczeniem α_0.

Na proces odprowadzania ciepła z materiału składają się trzy zjawiska: oddawanie ciepła od materiału do ścianki, przewodzenie przez ściankę bębna i przejmowanie ciepła przez otoczenie. Dwa ostatnie zjawiska mają taki sam przebieg jak w przypadku odprowadzania ciepła od czynnika, natomiast wymiana ciepła między materiałem a ścianką ma inny charakter. W zasadzie jest to przewodzenie (kontaktowe oddawanie ciepła), jednak — na skutek rozdrobnienia materiału i ciągłego mieszania cząstek — gradient temperatury w warstwie materiału jest niewielki (z wyjątkiem bardzo cienkiej warstwy materiału w pobliżu ścianki bębna). Można wobec tego z dobrym przybliżeniem traktować proces wymiany ciepła między materiałem a ścianką jako konwekcję między płynem a ścianką bębna.

Współczynnik przenikania ciepła k_m wyraża się więc wzorem

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{\alpha_{zm}} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{1}{\alpha_0}, \tag{12}$$

gdzie α_{zm} — zastępczy współczynnik przejmowania ciepła między warstwą materiału a ścianką.

Wyznaczanie współczynnika k według wzoru (11) jest możliwe, gdy znana jest metoda obliczania α i α_0. Podawane w literaturze zależności pozwalające wyliczyć współczynniki przejmowania ciepła nie uwzględniają wszystkich zjawisk, które mogą zachodzić w suszarce bębnowej. Wobec tego metoda taka nie zawsze może być stosowana.

Współczynnik k można również wyznaczyć z bilansu cieplnego, w przypadku gdy znany jest spadek temperatury czynnika wzdłuż długości pustego bębna.

Ciepło oddawane przez czynnik do otoczenia

$$Q_1 = Mc_p(t_{\mathrm{I}} - t_{\mathrm{II}}), \tag{13}$$

gdzie:

M — natężenie przepływu (wydatek masowy) czynnika,

$$M = \gamma v \frac{\pi d_b^2}{4},$$

γ — średnia masa właściwa (gęstość) czynnika,
v — średnia prędkość czynnika,
c_p — średnie ciepło właściwe czynnika,
t_{I} — średnia temperatura czynnika w przekroju x_{I},
t_{II} — średnia temperatura czynnika w przekroju x_{II}.

Ciepło pobierane przez otoczenie wyraża się wzorem

$$Q_2 = k \cdot S_b(\bar{t} - t_0), \tag{14}$$

gdzie:

S_b — powierzchnia płaszcza bębna między przekrojami x_{I} i x_{I},

$$S_b = \pi d_b(x_{\mathrm{II}} - x_{\mathrm{I}}),$$

$\bar{t}$ — średnia temperatura czynnika w objętości bębna między przekrojami x_{I} i x_{II},

$$\bar{t} = \frac{1}{V_b} \int_{V_b} t\,dV,$$

V_b — objętość bębna,
t_0 — temperatura otoczenia.

Ponieważ $Q_1 = Q_2$ można napisać w sposób następujący

$$Mc_p(t_{\mathrm{I}} - t_{\mathrm{II}}) = kS_b(\bar{t} - t_0),$$

stąd po przekształceniu otrzymuje się

$$k = \frac{d_b \gamma v c_p}{4(x_{\mathrm{II}} - x_{\mathrm{I}})} \cdot \frac{t_{\mathrm{I}} - t_{\mathrm{II}}}{\bar{t} - t_0}. \tag{15}$$

Wzór (15) określa współczynnik strat k w przypadku, gdy przez bęben nie przepływa materiał. Jeżeli w bębnie znajduje się nagrzewany materiał, to wartość k

może ulec zmianie. Jednak ze względu na to, że objętość zajmowana w bębnie przez materiał jest zazwyczaj dużo mniejsza niż objętość zajmowana przez czynnik, zmiana ta będzie niewielka.

Przedstawiona powyżej metoda nie może być wykorzystana do obliczania współczynnika k_m, ponieważ nie można określić udziału ilości ciepła odprowadzanego od materiału w całkowitej ilości ciepła oddawanej do otoczenia. W celu określenia zależności między k i k_m skorzystano z rozwiązań układu równań opisujących wymianę ciepła w bębnie. Jeżeli do wzorów (1) i (2) wprowadzi się warunek brzegowy dla $x = 0$, $t_m = t_0$, zależności te będą miały postać

$$\begin{cases} t-t_0 = C_1(R_1 e^{r_1 x} - R_2 e^{r_2 x}) & (16) \\ t_m - t_0 = C_1(e^{r_1 x} - e^{r_2 x}) & (17) \end{cases}$$

Po podzieleniu równania (17) przez (16) otrzymuje się

$$\frac{t_m - t_0}{t - t_0} = \frac{e^{r_1 x} - e^{r_2 x}}{R_1 e^{r_1 x} - R_2 e^{r_2 x}}. \tag{18}$$

Z dyskusji współczynników r_1 i r_2 wynika, że

$$r_1 < 0, \quad r_2 < 0$$

oraz

$$|r_1| > |r_2|.$$

Dla dostatecznie dużych wartości $(a\alpha)_b$

$$e^{r_1 x} \ll e^{r_2 x}.$$

Ponieważ

$$|R_1| < |R_2|,$$

to również będzie

$$|R_1 e^{r_1 x}| \ll |R_2 e^{r_2 x}|.$$

Można więc przyjąć, że

$$\frac{t_m - t_0}{t - t_0} \approx \frac{1}{R_2}. \tag{19}$$

Wprowadzono oznaczenie

$$\frac{t - t_0}{t_m - t_0} = \varphi(x). \tag{20}$$

Podstawiając do wzoru (19) zależności (20) oraz (5) i (3) otrzymano

$$\varphi = \frac{1}{2C}\left[-(A+B-C-D)+\sqrt{(A+B-C-D)^2+4AC}\right]. \tag{21}$$

Równanie (21) należy rozwiązać względem współczynników A i C, w których zawarte jest $(a\alpha)_b$. Przy założeniu $C \neq 0$ oraz wykorzystaniu zależności (6), (7), (8), (9) otrzymano

$$(a\alpha)_b = \frac{\varphi}{\varphi-1} \cdot \frac{\dfrac{k_m}{W_m} - \dfrac{k}{W}}{\dfrac{d_b}{4}\left(\varphi \dfrac{1}{W_m} + \dfrac{1}{W}\right)}. \tag{22}$$

Lewa strona wzoru (22) nie jest zależna od wartości x, ponieważ przyjęto, że $(a\alpha)_b$ jest stałe. Jeżeli dla dwóch wartości x_1 i x_2 znane są wartości funkcji $\varphi(x_1)$ i $\varphi(x_2)$, to można napisać

$$\frac{\varphi(x_1)}{\varphi(x_1)-1} \cdot \frac{\dfrac{k_m}{W_m} - \dfrac{k}{W}}{\dfrac{d_b}{4}\left[\varphi(x_1)\dfrac{1}{W_m} + \dfrac{1}{W}\right]} = \frac{\varphi(x_2)}{\varphi(x_2)-1} \cdot \frac{\dfrac{k_m}{W_m} - \dfrac{k}{W}}{\dfrac{d_b}{4}\left[\varphi(x_2)\dfrac{1}{W_m} + \dfrac{1}{W}\right]}. \tag{23}$$

Ponieważ $\varphi(x) > 1$ dla $x < \infty$, to po przekształceniu wzoru (23) otrzymuje się zależność

$$\frac{k}{k_m} = \frac{W}{W_m}. \tag{24}$$

Po znalezieniu wartości współczynnika k obliczonego ze wzoru (15) można wyznaczyć k_m

$$k_m = k \cdot \frac{W_m}{W}. \tag{25}$$

W obliczeniach wymienników ciepła przyjmuje się współczynniki przenikania ciepła odniesione do rzeczywistej powierzchni styku między ścianką a czynnikiem wymieniającym ciepło. Natomiast podane powyżej definicje współczynników k i k_m określają straty przypadające na jednostkę powierzchni bębna.

Jeżeli przez k_s i k_{sm} oznaczy się odpowiednio współczynniki strat odniesione do rzeczywistej powierzchni styku czynnika oraz materiału ze ścianką bębna, to zachodzą związki

$$k = k_s \cdot \frac{S}{S_b}, \tag{26}$$

$$k_m = k_{sm} \cdot \frac{S_m}{S_b}. \tag{27}$$

gdzie:

S_b — powierzchnia płaszcza bębna; ze względu na to, że grubość ścianki jest dużo mniejsza od średnicy bębna, S_b przyjmuje się jako średnią arytmetyczną z powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej,

S — powierzchnia styku czynnika ze ścianką bębna,

S_m — powierzchnia styku materiału ze ścianką bębna.

Oczywiście

$$S_b = S+S_m.$$

Dzieląc stronami wzory (26) i (27) otrzymano

$$\frac{k}{k_m} = \frac{k_s}{k_{sm}} \cdot \frac{S}{S_m}, \tag{28}$$

a po porównaniu z zależnością (24)

$$\frac{k}{k_m} = \frac{k_s}{k_{sm}} \cdot \frac{S}{S_m} = \frac{W}{W_m}. \tag{29}$$

Na wartości współczynników k_s i k_{sm} decydujący wpływ wywiera współczynnik przejmowania ciepła na zewnątrz bębna α_0. Ponieważ jest on znacznie mniejszy od współczynników przejmowania ciepła wewnątrz bębna (między czynnikiem a ścianką oraz między materiałem a ścianką), to można przyjąć

$$k_s \approx k_{sm}.$$

Wynika stąd, że

$$\frac{W}{W_m} = \frac{S}{S_m}$$

lub też

$$\frac{Mc_p}{M_m c_{pm}} = \frac{S}{S_m}.$$

Przyjęcie tej zależności wydaje się być uzasadnione. Ponieważ wartości c_p dla powietrza i c_{pm} dla płodów rolnych są tego samego rzędu, to stosunek powierzchni bębna opływanej przez czynnik i zajmowanej przez materiał zależy głównie od masowego natężenia przepływu czynnika i materiału. Poprawność tej zależności powinna być sprawdzona na drodze eksperymentalnej.

W powyższych rozważaniach przyjęto, że wartości współczynników k i k_m są stałe, niezależne od temperatury. W rzeczywistości współczynniki k i k_m mogą być funkcją temperatury, zmieniać się więc będą wzdłuż długości bębna. Charakter tych zmian nie jest jednak znany, przypuszczalnie będą one bardzo niewielkie.

Wartości współczynników strat k i k_m wpływają na objętościowy współczynnik przejmowania ciepła $(a\alpha)_b$. Przyjęcie stałości k i k_m może więc powodować pewne nieznaczne zmiany wartości $(a\alpha)_b$.

Jeżeli wyrażenie (25) wprowadzi się do zależności (3), (4), (5), to ulegną one znacznemu uproszczeniu

$$r_1 = -(A+B+C), \tag{30}$$

$$r_2 = -B, \tag{31}$$

$$R_1 = -\frac{A}{C} = -\frac{W_m}{W}, \tag{32}$$

$$R_2 = 1. \tag{33}$$

Wprowadzenie warunku (25) do równań (1) i (2) daje znaczne uproszczenie wzorów i umożliwia ich rozwikłanie względem $(a\alpha)_b$.

Dotychczasowe rozważania, dotyczące przebiegu temperatur czynnika i materiału wzdłuż długości bębna, prowadzone były przy założeniu stałej wartości $(a\alpha)_b$. Okazuje się jednak, że uzyskane z obliczeń wartości temperatur znacznie odbiegają od wyników pomiarów. Charakter przebiegów temperatury materiału i czynnika pozwala wysnuć wniosek, że współczynnik $(a\alpha)_b$ zmienia się wzdłuż długości bębna. Jest on funkcją temperatury, ale matematyczna forma tej zależności nie jest znana.

Znalezienie wartości $(a\alpha)_b$ w dowolnym punkcie bębna jest możliwe w przypadku, gdy znane są temperatury czynnika i materiału w tym punkcie.

Wprowadzono oznaczenie

$$F = \frac{e^{r_1 x} - e^{r_2 x}}{R_1 e^{r_1 x} - e^{r_2 x}}. \tag{34}$$

Wyrażenie to otrzymano z zależności (18) po wprowadzeniu do niej warunku (33). Znając temperatury czynnika i materiału oraz temperaturę otoczenia można obliczyć wartość F w danym punkcie, ponieważ

$$F = \frac{t_m - t_0}{t - t_0}.$$

Wzór (34) można napisać w postaci

$$e^{(r_1 - r_2)x} = \frac{F-1}{FR_1 - 1},$$

a po zlogarytmowaniu

$$(r_1 - r_2)x = \ln \frac{F-1}{FR_1 - 1}.$$

Wykorzystując zależności (30), (31), (32) oraz (6) i (8) można wzór ten rozwikłać względem $(a\alpha)_b$

$$-\frac{\pi d_b^2}{4}\left(\frac{1}{W} + \frac{1}{W_m}\right)(a\alpha)_b x = \ln \frac{1-F}{1+F\dfrac{W_m}{W}},$$

stąd

$$(a\alpha)_b = -\frac{4}{\pi d_b^2} \cdot \frac{WW_m}{W+W_m} \cdot \frac{1}{x} \cdot \ln \frac{1-F}{1+F\dfrac{W_m}{W}}. \tag{35}$$

Wzór (35) można stosować do wyznaczania wartości $(a\alpha)_b$ tylko wówczas, jeżeli znany jest przebieg temperatur materiału i czynnika wzdłuż długości bębna. W niektórych konstrukcjach suszarek bębnowych pomiar temperatury czynnika jest możliwy tylko w jednym punkcie — na końcu bębna. Według wzoru (35) można więc znaleźć $(a\alpha)_b$ tylko w punkcie x_{II}. Znając tę wartość można wyznaczyć stałą całkowania C_1 określoną wzorem (10). Okazuje się, że wartość C_1 dla dowolnej wartości x równa się

$$C_1(x) = \frac{t_m(x) - t_0}{e^{r_1 x} - e^{r_2 x}} \tag{36}$$

i bardzo nieznacznie różni się od $C_1(x_{II})$.
Można więc przyjąć

$$C_1(x) = C_1(x_{II}) = \text{const.}$$

W przypadku gdy znany jest tylko przebieg temperatury materiału, wykorzystanie tego warunku pozwala na wyznaczenie ze wzoru (2) wartości $(a\alpha)_b$ dla dowolnego x. Wzór ten można napisać w postaci

$$t_m - t_0 = C_1 e^{r_1 x} - C_1 e^{r_2 x},$$

przekształcając to wyrażenie otrzymuje się kolejno

$$e^{r_1 x} = e^{r_2 x} + \frac{t_m - t_0}{C_1},$$

$$r_1 = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{t_m - t_0}{C_1} + e^{r_2 x}\right),$$

a po wykorzystaniu zależności (30), (31) oraz (6), (7), (8),

$$-(A + C) = B + \frac{1}{x} \ln\left(\frac{t_m - t_0}{C_1} + e^{-Bx}\right),$$

$$(a\alpha)_b = -\frac{4W_m}{d_b(W + W_m)}\left[k - \frac{W}{\pi d_b x} \ln\left(\frac{t_m - t_0}{C_1} + e^{-\frac{\pi d_b}{W} kx}\right)\right]. \tag{37}$$

Przeprowadzone obliczenia wskazują na to, że przebieg zmienności $(a\alpha)_b$ wzdłuż długości bębna można z dużą dokładnością aproksymować funkcją wykładniczą o postaci

$$(a\alpha)_b = \Psi e^{-\mu x}, \tag{38}$$

gdzie Ψ, μ — stałe empiryczne, przy czym

$$\Psi > 0, \quad \mu > 0.$$

Uzyskane w ten sposób wartości objętościowego współczynnika przejmowania ciepła mogą służyć do porównywania suszarek różnych konstrukcji.

LITERATURA

1. Ciborowski J.: Inżynieria chemiczna, cz. II. PWT, Warszawa 1953.
2. Pabis S., Gadaj S. P., Suprunowicz R.: Model matematyczny bębnowego współprądowego wymiennika ciepła przy stałych wartościach współczynników wymiany ciepła. IMER, Warszawa 1971.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЁМНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООБМЕНА В БАРАБАННОЙ СУШИЛКЕ

С. ПАБИС, С. П. ГАДАЙ, Р. СУПРУНОВИЧ — Польша

Резюме

Процесс нагревания зернистого материала в барабанной сушилке характеризуется объёмным коэффициентом теплообмена. Этот коэффициент определяет принимаемое материалом от агента количество тепла в единице объёма барабана в единицу времени при разнице температур 1°C.

Во время работы сушилки часть тепла передается посредством кожуха барабана в окружающую среду. Это тепло отдается как агентом, так и материалом.

Описание процесса теплообмена в барабане системой дифференциальных уравнений и решение этой системы разрешило найти распределение температур материала и агента вдоль длины барабана, и в дальнейшем — определение объёмного коэффициента теплообмена.

В уравнениях, описывающих распределение температур в барабане сушилки, для учёта потерь вводятся выражения, в состав которых входят коэффициенты теплообмена между агентом и средой, а также между нагреваемым материалом и средой.

Эти коэффициенты, которые мы в дальнейшем будем называть коэффициентами потерь, определяют количество тепла уходящего в течение единицы времени на единицу поверхности кожуха барабана при разнице температур 1°C. Коэффициенты потерь в таком положении относятся к полной поверхности барабана (независимо от действительной поверхности соединения агента и материала с кожухом барабана).

Коэффициент потерь между агентом и средой определяется по тепловому балансу на основании измерений температур агента вдоль длины пустого барабана.

Анализ решений уравнений, определяющих теплообмен с принятыми граничными условиями привел к определению зависимости между коэффициентами потерь для агента и для материала. Эта зависимость прямо пропорциональна водным эквивалентам агента и материала.

Дифференциальные уравнения, описывающие теплообмен решены, принимая постоянную величину объёмного коэффициента теплообмена и коэффициентов потерь. Сравнивая решения этих уравнений с экспериментальными результатами замечена, во всех рассматриваемых случаях, переменность этого коэффициента вдоль длины барабана. Целью получения этой переменности аналитическим путем произведены расчёты, изменяющие длину рассматриваемого отрезка барабана при помощи передвижения конечного пункта, т. е., принимая величины температур, представляющие собой граничное условие для разных расстояний от начала барабана.

Полученные таким образом величины объёмного коэффициента теплообмена могут применяться для сравнения сушилок разной конструкции.

DETERMINATION OF VOLUME COEFFICIENT OF HEAT TRANSFER IN THE DRUM DRIER

S. PABIS, S. P. GADAJ, R. SUPRUNOWICZ — Poland

Summary

The heating process of grain material in the drum of rotary drier is characterized by the volume coefficient of heat transfer. This coefficient defines the quantity of heat received by the material from the drying agent in a drum volume unit, at a time unit and temperature difference of 1°C.

At the operation of drier some heat is transfered through the coat of drum to the environment. This heat is emitted both, by the drying agent und the material being dried.

The discription of heat transfer process in the drum by means of differential equation system and its solution enabled to find the temperature distribution of the material and heating agent along the length of drum, and subsequently, to determine the volume coefficient of heat transfer.

To take into account the losses of heat, the expressions comprising the coefficients of heat transfer between the drying agent and environment as well as between the material being dried and environment were introduced into equations describing the temperature distribution along the length of drying drum.

The coefficients mentioned above, which will further be termed as loss-coefficients, determine the quantity of heat removed at a time unit from an unit of drum coat surface, at a temperature difference of 1°C.

Formulated this way the loss-coefficients refer to the total drum surface (independently of the real contact surface of drum coat with the drying agent and material being dried).

The loss-coefficient between the drying agent and environment is calculated from the heat balance on the basis of drying agent temperature measurements along the length of empty drum.

The analysis of solution of the equations describing the heat transfer under given boundary conditions has enabled to find the relation between the loss-coefficients for drying agent and for the material. The mentioned relation is directly proportional to the heat flow equivalents* of drying agent and material being dried.

The solution of differential equations describing the heat transfer was found, assuming the constant values of volume coefficient of the heat transfer and loss-coefficients. Comparing the solutions of these equations with the experimental results the variability of mentioned coefficient along the length of drum has been stated in all the cases being considered.

In purpose to find this variability by analytical method the calculations have been conducted at various length of considered drum section through displacing of the final point, i.e. accepting the values of temperature being the boundary condition for various distances from the inlet point of drum.

DIE BESTIMMUNG DES RAUMKOEFFIZIENTES DER WARMEÜBERNAHME IN DEN TROMMELTROCKNERN

S. PABIS, S. P. GADAJ, R. SUPRUNOWICZ — Polen

Zusammenfassung

Das Anwärmeverfahren des kornigen Materials in dem Trommel des Trommeltrockners charakterisiert sich mit dem Raumkoeffizient der Wärmeübernahme. Dieser Koeffizient bezeichnet die Wärmemenge, welche durch das Material von dem trockenden Gas in der Einheit des Raumgehaltes des Trommels während der Zeiteinheit bei dem Temperaturunterschied von 1°C übernommen wird.

Während der Arbeit des Trockners ein Teil der Wärme wird durch den Trommelmantel zur Umgebung abgeführt. Diese Wärme wird so durch Gas wie durch des Material abgegeben.

Die Beschreibung des Wärmeaustauschverfahrens in dem Trommel mit der Anordnung der Differentialgleichungen und die Lösung dieser Anordnung erlaubte das Finden des Temperatur-

* Heat flow equivalent $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{h°C}}\right)$ = rate of mass flow × specific heat. Obtained such a way values of the volume coefficient of the heat transfer may be useful to comparative testing of the driers of different designs.

verlaufes des Materials und des Gases längs der Trommellänge und dann — die Bestimmung des Raumkoeffizientes der Wärmeübernahme.

In der Gleichungen die den Temperaturverlauf in dem Trocknungstrommel beschreiben führt man zur Berücksichtigung der Wärmeverluste die Ausdrücke ein, welche die Wärmedurchdringungskoeffiziente zwischen dem Gas und der Umgebung und zwischen dem anwärmten Material und der Umgebung enthalten.

Diese Koeffiziente, weiter Verlustkoeffiziente genannt, bezeichnen die Wärmemenge, welche während der Zeiteinheit durch die Einheit der Oberfläche des Trommelmantels bei dem Temperaturunterschied von 1°C abgeführt wird. Die Verlust — koeffiziente in solcher Fassung sind zur ganzen Trommeloberfläche abgetragen unabhängig von der tatsächlichen Berührungsfläche des Gases und des Materials mit dem Trommelmantel.

Der Verlustkoeffizient zwischen dem Gas und der Umgebung bezeichnet man aus dem Wärmebilanz auf Grund der Temperaturbemessungen des Gases längs der Länge des leeren Trommels.

Die Analyse der Lösungen der Gleichungen die den Wärmeaustausch beschreiben mit den angegebenen Grenzbedingungen hat zum Finden der Abhängigkeit zwischen den Verlustkoeffizienten für das Gas und für das Material zugeführt. Es ist die direkt proportionale Abhängigkeit zu den Wasseräquivalenten des Gases und des Materials.

Die beschreibenden den Wärmeaustausch Differentialgleichungen hat man mit der Voraussetzung des ständigen Wertes des Raumkoeffizientes der Wärmeübernahme und der Verlustkoeffiziente gelöst. Bei dem Vergleich der Gleichungslösungen mit den experimentalen Ergebnissen hat man in den allen berücksichtigten Fällen die Veränderlichkeit dieses Koeffizientes längs der Trommellänge festgestellt. Zum Erhalten dieser Veränderlichkeit auf dem analytischen Wege hat man die Berechnungen ausgeführt, in welchen die Länge des untersuchten Abschnittes des Trommels durch die Verschiebung des Endpunktes sich veränderte, d.h. man hat die Temperaturwerte als Grenzbedingungen für die verschiedenen Entfernungen vom Anfang des Trommels angenommen.

Die auf dieser Weise erhaltenen Werte des Raumkoeffizientes der Wärmeübernahme können zum Vergleich der Trocknern mit verschiedenen Konstruktionen dienen.