

MATEMATYCZNY MODEL WYMIANY CIEPŁA
W SUSZARCE KOLUMNOWO-GRAWITACYJNEJ
PRACUJĄCEJ WEDŁUG ZASADY PRĄDU SKRZYŻOWANEGO
CZĘŚĆ I. SFORMUŁOWANIE MODELU MATEMATYCZNEGO
I JEGO WERYFIKACJA

Stefan Cenkowski

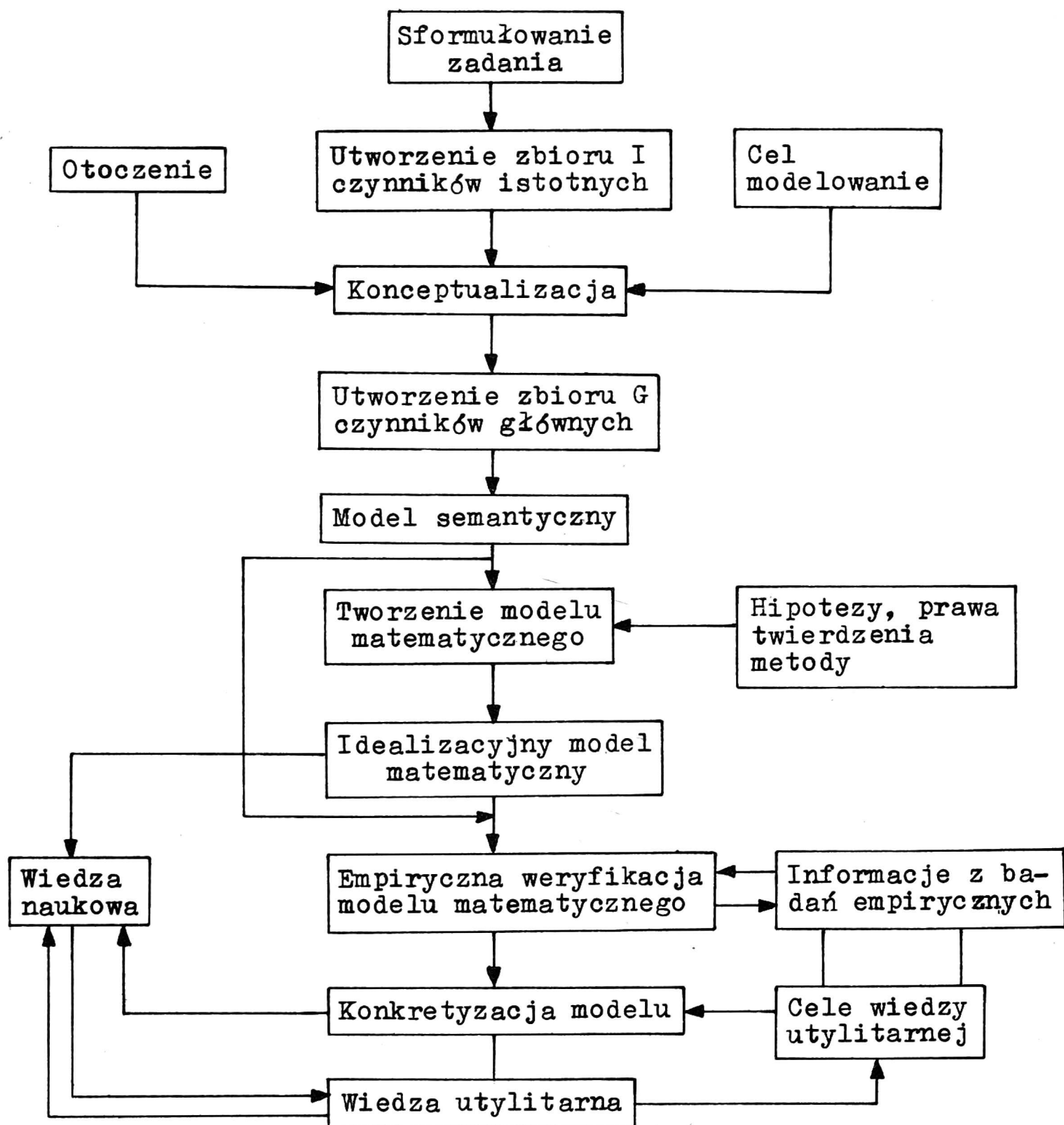
Instytut Mechanizacji Rolnictwa AR we Wrocławiu

WSTĘP

Suszarka kolumnowo-grawitacyjna należy do grupy suszarek konwekcyjnych pracujących według zasady prądu skrzyżowanego. Suszenie odbywa się w komorze suszenia, przez którą przepływa jednocześnie suszony materiał oraz czynnik suszący, przy czym wypadkowe kierunki obu przepływów krzyżują się pod kątem prostym. Prace podjęte na Uniwersytecie w Michigan, a dotyczące prądu skrzyżowanego sprowadzają układ do złoża nieruchomego, podając równania różniczkowe dla zmiany temperatury ziarna, czynnika suszącego, zmiany jego wilgotności, oraz zmiany wilgotności produktu [8]. Przy czym te ostatnie otrzymano z empirycznych zależności dotyczących cienkiej warstwy ziarna. Natomiast sam sposób rozumowania oparto na matematycznej zależności opisującej suszenie w kapilarach porowatych produktów, którą rozwinął Łytkow [5].

Uproszczony model matematyczny dla złoża nieruchomego i przeciwprądu z możliwością zastosowania do symulacji na cyfrowo-analogowych komputerach podali Farmer, Bakker-Arkema, Pabis, Thompson i inni. Również w Instytucie Mechanizacji Rolnictwa AR we Wrocławiu rozpoczęto prace nad tym tematem. Na podstawie badań przeprowadzonych przez Kamińskiego i innych [3] na suszarni SZ-5 stwierdzono, że ilość przejmowanego ciepła przez ziarno zależała od natężenia przepływu suszonej masy. Prace prowadzono na modelu suszarki komorowo-daszkowej [4] pozwoliły na opracowanie opisu matematycznego procesu wymiany ciepła między ziarnem a czynnikiem suszącym. Model ten oparto na parametrach wejścia i wyjścia, ze względu na trudny do określenia tor cząsteczek.

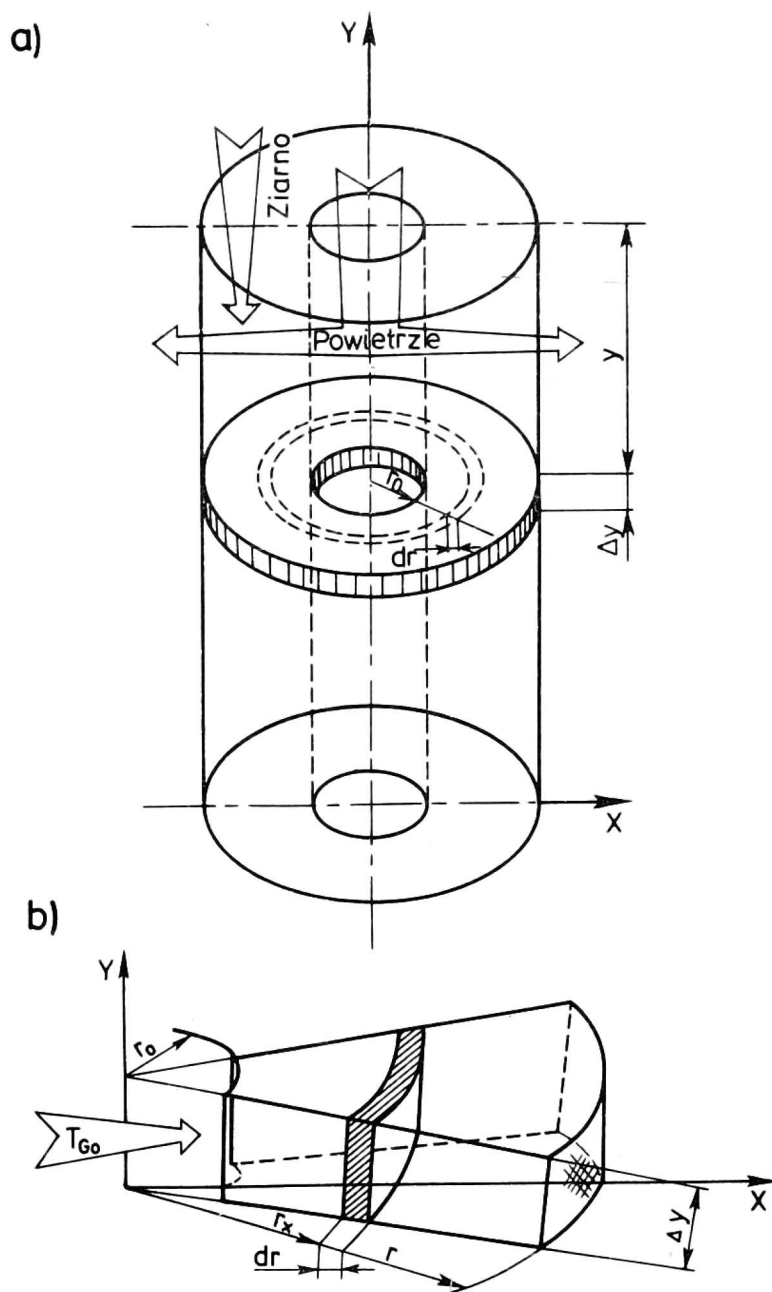
Proces modelowania można przedstawić schematycznie [7]



MODEL MATEMATYCZNY WYMIANY CIEPŁA DLA SUSZARKI GRAWITACYJNEJ PRACUJĄCEJ WEDŁUG ZASADY PRĄDU SKRZYŻOWANEGO

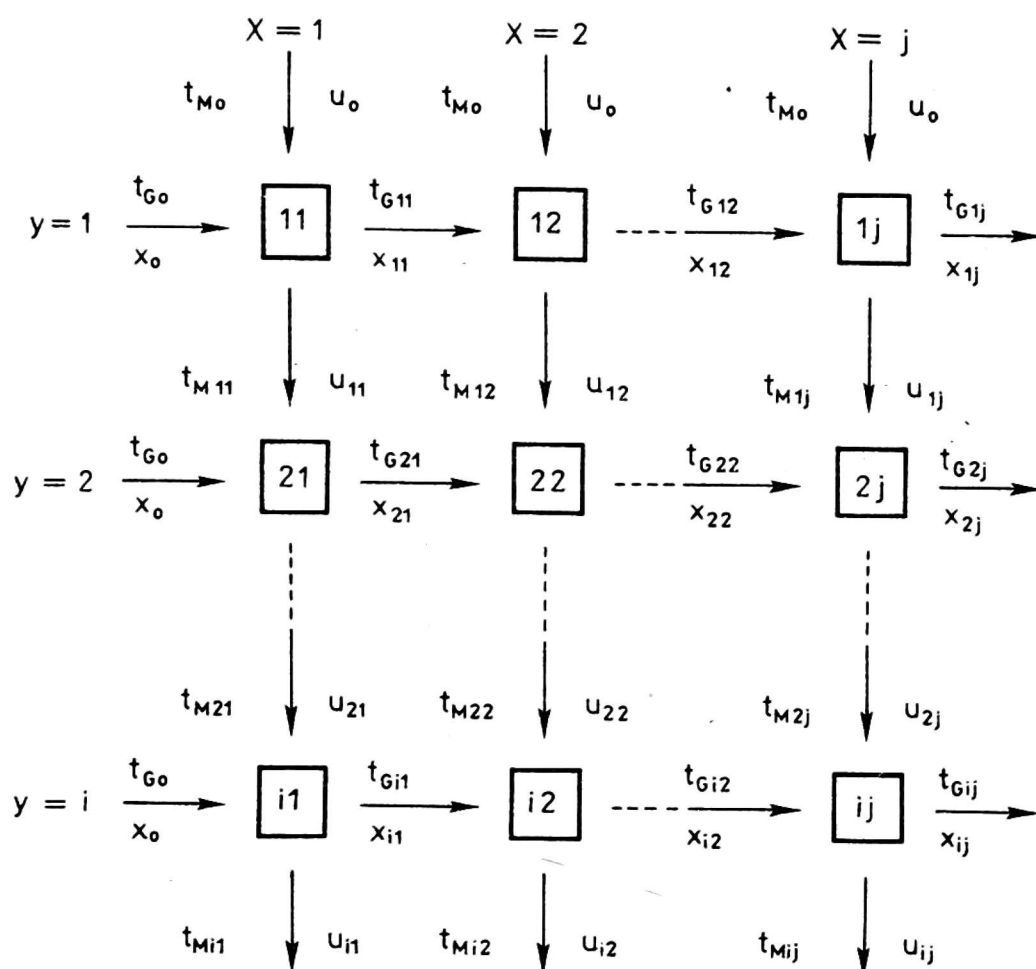
W Instytucie Mechanizacji Rolnictwa AR we Wrocławiu opracowano matematyczny opis rozkładu temperatur czynnika suszącego i ziarna w komorze suszenia dla suszarki kolumnowo-grawitacyjnej bazujący na ogólnie przyjętych prawach fizyki oraz przeprowadzono jego weryfikację w warunkach modelu suszarki wykonanej w skali

półtechnicznej (1:5) w porównaniu z silosem-suszarnią SZD-3 produkcji krajowej. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie układ



Rys. 1. Schemat układu: a) parametrów dla komory, b) elementarna wysokość y

parametrów do obliczeń wymiany ciepła. Obszar komory został podzielony na elementarne objętości Fdr . Taką wydzieloną elementarną objętość przedstawia rysunek 1b. Wzdłuż osi X przepływa powietrze o parametrach początkowych: temperatura na wejściu t_{Go} [$^{\circ}C$], zawartość wody x_0 [kg H_2O /kg s.p.]. Parametry te są stałe na całej wysokości kolumny. Prostopadle, wzdłuż osi Y przepływa ziarno o parametrach początkowych: temperatura ziarna przed wejściem do suszarki t_{Mo} [$^{\circ}C$], zawartość wody w ziarnie u_0 [kg H_2O /kg s.m.]. Elementarne objętości zostały ustawione w szeregach w kierunku osi X oraz osi Y (rys. 2).



Rys. 2. Schemat indeksów dla temperatury powietrza, temperatury ziarna, wilgotności powietrza i wilgotności ziarna przy suszeniu w prądzie skrzyżowanym

W momencie, gdy elementarna objętość 1.1. wchodzi do strefy suszenia, gorące powietrze o parametrach t_{G0} , x_0 przepływa przez tę objętość, ochładza się do temperatury $t_{G1.1}$, jednocześnie odbierając wilgoć od ziarna i nasyca się do zawartości wody $x_{1.1}$. Powietrze o nowych parametrach przepływa przez kolejną elementarną objętość 1.2. oddając ciepło i jednocześnie odbierając wilgoć od ziarna, itd. aż do opuszczenia suszarki. Jednocześnie elementarna objętość ziarna 1.1. pobiera ciepło od powietrza i po wyjściu z tej strefy uzyska temperaturę $t_{M1.1}$ oraz obniża zawartość wody do wartości $u_{1.1}$. Dalszy tok rozumowania jest podobny, aż do momentu gdy wszystkie objętości zostaną tak rozpatrzone.

W procesie suszenia zachodzącym bez strat ciepła, elementarne ciepło dostarczone przez czynnik suszący dq_d zużywane jest na nagrzanie dq_t elementarnej objętości ziarna oraz na odparowanie wody z tej objętości dq_r .

$$dq_d = dq_t + dq_r \quad (1)$$

Elementarna wartość ciepła dostarczonego przez czynnik suszący wynosi:

$$dq_d(x) = - 2\pi \cdot v_o \cdot r_o \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y \cdot dt_G(x) \cdot \tau \quad (2)$$

gdzie:

- v_p - prędkość przepływu czynnika suszącego [m/s],
- ρ_p - gęstość czynnika suszącego [kg/m³],
- c_p - ciepło właściwe czynnika suszącego [kJ/kg · deg],
- τ - czas [s],
- r_o - promień pierścienia wewnętrznego [m].

Przed prawą stroną równania postawiono znak minus, ponieważ przyrost temperatury powietrza $dt_G(x) < 0$.

Ostatecznie przyrost temperatury czynnika suszącego wynosi:

$$dt_G(x) = - \frac{dq_d(x)}{2\pi \cdot r_o \cdot v_o \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y \cdot \tau} \quad (3)$$

Wartość ciepła zużytego na nagrzanie się ziarna w dowolnym miejscu osi X, na jednym poziomie Y:

$$dq_t(x) = \dot{M} \cdot c(x) \cdot dt_M(x) \cdot \tau \quad (4)$$

gdzie:

- \dot{M} - natężenie przepływu masy ziarna przez elementarny przekrój [kg/s],
- c - ciepło właściwe ziarna [kJ/kg · deg].

Wartość $c(x)$ jest zmienna, jednak w celu uproszczenia obliczeń przyjęto, że jest stała $c(x) = c$.

Elementarny przyrost temperatury ziarna wyraża się z zależnością:

$$dt_M(x) = - \frac{dq_t(x)}{\dot{M} \cdot c \cdot \tau} \quad (5)$$

W dowolnym miejscu różnica między temperaturą gazu a temperaturą ziarna wynosi:

$$t_G(x) - t_M(x) = \Delta t(x) \quad (6)$$

przechodząc do granicy

$$dt_G(x) - dt_M(x) = d\Delta t(x) \quad (7)$$

Podstawiając do równania (7) zależności wyliczone wcześniej (równanie 3 i 5) otrzymano:

$$d\Delta t(x) = - \frac{dq_d(x)}{2\pi \cdot r_o \cdot \rho_p \cdot v_o \cdot c_p \cdot \Delta y \cdot \tau} + \frac{dq_t(x)}{\dot{M} \cdot c \cdot \tau} \quad (8)$$

Wprowadza się współczynnik ψ określający stosunek natężenia przepływu ciepła zużywanego na nagrzanie produktu do całkowitego natężenia przepływu ciepła, czyli tzw. współczynnik wykorzystania ciepła na nagrzanie ziarna [6]:

$$\psi = \frac{dq_t}{dq_d} \leq 1 \Rightarrow dq_t = \psi dq_d \quad (9)$$

Wstawiając równanie (9) do (8) otrzymuje się:

$$d\Delta t(x) = - \frac{dq_d(x)}{\tau} \cdot \left[\frac{1}{2\pi \cdot r_o \cdot v_o \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y} - \psi \frac{1}{\dot{M} \cdot c} \right] \quad (10)$$

lub oznaczając wyrażenie w nawiasie przez m

$$d\Delta t(x) = - \frac{dq_d(x) \cdot m}{\tau} \quad (11)$$

Natężenie ciepła dostarczonego do ciała stałego wyraża również równanie:

$$dq_d(x) = (a\alpha) \cdot 2\pi \cdot r(x) \cdot dr(x) \cdot \Delta y \cdot \Delta t(x) \cdot \tau \quad (12)$$

$(a\alpha)$ - objętościowy współczynnik wnikania ciepła, odniesiony do objętości strefy nagrzewania [$\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{deg}$]

Podstawiając równanie (12) do równania (11) i dzieląc przez $\Delta t(x)$ otrzymuje się:

$$\frac{d\Delta t(x)}{\Delta t(x)} = - (a\alpha) \cdot 2\pi \cdot \Delta y \cdot r(x) \cdot dr(x) \cdot m$$

natomiast całkując powyższe równanie:

$$\int_{\Delta t_o}^{\Delta t(x)} \frac{d\Delta t(x)}{\Delta t(x)} = - (a\alpha) \cdot 2\pi \cdot \Delta y \cdot m \cdot \int_{r_o}^{r(x)} r(x) \cdot dr(x)$$

Ostatecznie otrzymujemy:

$$\frac{\Delta t(x)}{\Delta t_o} = \exp \left\{ - (a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot m \cdot [r^2(x) - r_o^2] \right\} \quad (13)$$

Z równania (11) wynika, że:

$$\frac{dq_d(x)}{\tau} = - \frac{d\Delta t(x)}{m}$$

Tę zależność wstawiając do równania (3) otrzymamy:

$$dt_G(x) = \frac{d\Delta t(x)}{m \cdot 2\pi \cdot r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y} \quad (14)$$

Równanie (13) można zapisać:

$$\Delta t(x) = \Delta t_0 \cdot \exp \left\{ - (a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot m \cdot [r(x)^2 - r_0^2] \right\}$$

Po zróżniczkowaniu ostatniego równania względem zmiennej $r(x)$ i wstawieniu otrzymanej różniczki $d\Delta t(x)$ do równania (14):

$$dt_G(x) = - \frac{\Delta t_0 \cdot (a\alpha) \cdot r(x) \cdot \exp \left\{ (a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot m \cdot r_0^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -(a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot m \cdot r(x)^2 \right\}}{r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p} \cdot dr(x)$$

Scałkowanie tego równania pozwoli na określenie temperatury gazu

$$\int_{t_G(x)}^{t_{Go}} dt_G(x) = - \frac{\Delta t_0 \cdot (a\alpha) \cdot \exp \left\{ (a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot m \cdot r_0^2 \right\}}{r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p} \cdot \int_{r_0}^{r(x)} r(x) \cdot \exp \left\{ -(a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot m \cdot r(x)^2 \right\} dr(x) \quad (15)$$

Z lewej strony równania zmieniono granice całkowania ze względu na ujemny przyrost temperatury.

Po rozwiązaniu całki otrzymano postać równania temperatury czynnika suszącego dla warstwy Δy :

$$t_G(x) = t_{Go} - \frac{(t_{Go} - t_{Mo}) \cdot [r(x) - r_0] \cdot \exp \left\{ (a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot \left[\frac{1}{2\pi \cdot r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y} - \psi \frac{1}{M \cdot c} \right] \cdot r_0^2 \right\}}{2\pi \cdot r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y \cdot \left[\frac{1}{2\pi \cdot r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y} - \psi \frac{1}{M \cdot c} \right]} \quad (16)$$

Uwzględniając indeksy elementarnych objętości (rys. 2) równanie (16) pozwoli na określenie temperatury w zupełnie dowolnym miejscu komory suszenia dla suszarki kolumnowo-grawitacyjnej:

$$t_{Gi,j} = t_{Gi,(j-1)} - \frac{[t_{Gi,(j-1)} - t_{M(i-1),j}] \cdot [r_j - r_{(j-1)}] \cdot \exp \left\{ (a\alpha)_{i,j} \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot \left[\frac{1}{2\pi \cdot r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y} - \psi_{i,j} \frac{1}{M_{ij} \cdot c} \right] \cdot r_{(j-1)}^2 \right\}}{2\pi \cdot r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y \cdot \left[\frac{1}{2\pi \cdot r_0 \cdot v_0 \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \Delta y} - \psi_{i,j} \frac{1}{M_{ij} \cdot c} \right]} \quad (17)$$

ponieważ

$$\Delta t(x) = t_G(x) - t_M(x)$$

oraz

$$\Delta t(x) = \Delta t_0 \exp \left\{ - (a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot m \cdot [r(x)^2 - r_0^2] \right\}$$

Stąd obliczenie temperatury ziarna jest następujące

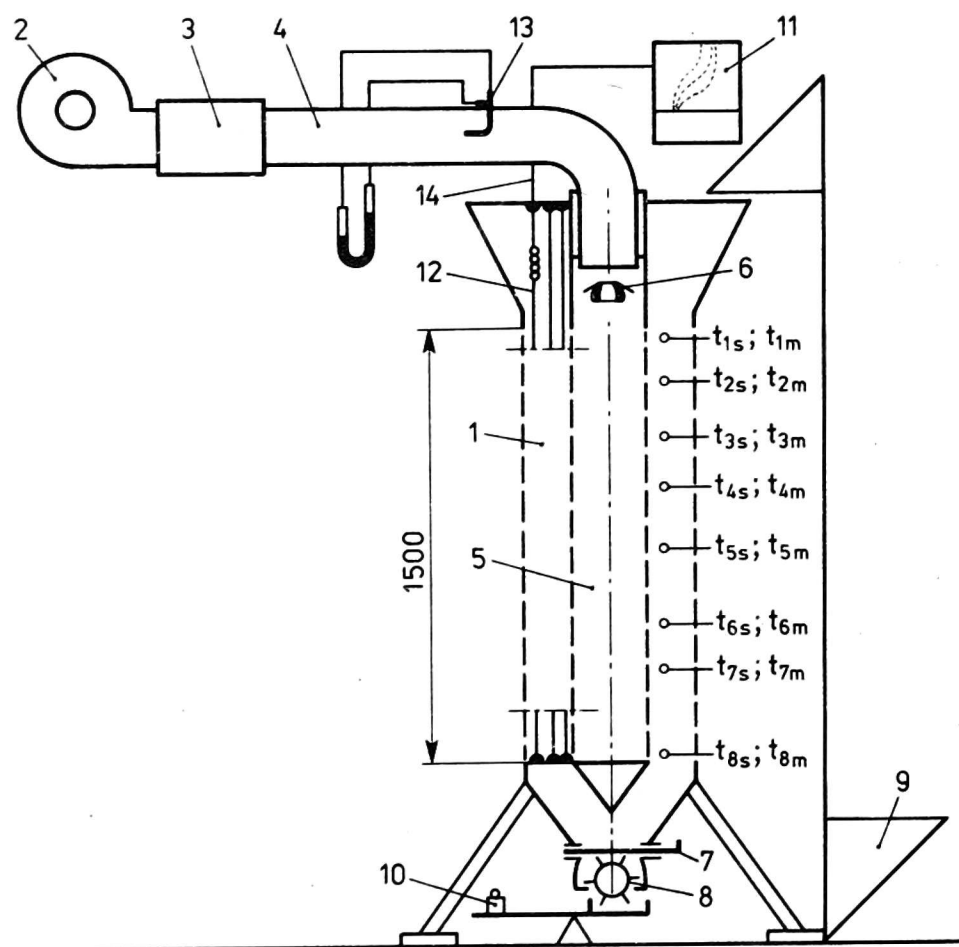
$$t_M(x) = t_G(x) - \Delta t_o \exp \left\{ - (a\alpha) \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot m \left[r(x)^2 - r_o^2 \right] \right\} \quad (18)$$

Uwzględniając indeksy (rys. 2) temperatura ziarna w dowolnym miejscu ma wartość:

$$t_{Mij.} = t_{Gi.j.} - [t_{Gi(j-1)} - t_{M(i-1)j}] \cdot \exp \left\{ -(a\alpha)_{ij} \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot \left[\frac{1}{2\pi \cdot r_o \cdot v_o \cdot \rho_p \cdot C_p \cdot \Delta y} - \psi_{ij} \cdot \frac{1}{\dot{M}_{ij} \cdot c} \right] \cdot [r_j^2 - r_{(j-1)}^2] \right\} \quad (19)$$

WERYFIKACJA SFORMUŁOWANYCH MODELI MATEMATYCZNYCH

Aby potwierdzić słuszność równań matematycznych opisujących rozkład temperatur ziarna i czynnika suszącego, wykonano serię pomiarów na specjalnie w tym celu skonstruowanym stanowisku pomiarowym (rys. 3). Wentylator tłoczył powietrze poprzez nagrzewnicę do przewodu centralnego. Dalej nagrzane powietrze do temperatury



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 - komora ziarna, 2 - sekcja wentylatorów, 3 - nagrzewnica, 4 - przewód powietrzny, 5 - komora powietrzna, 6 - kierownica, 7 - zasuwa, 8 - wygarniacz, 9 - przenośnik, 10 - waga, 11 - rejestrator, 12 - struny metalowe, 13 - rurka Prandtla, 14 - termopara ziarna

42°C przepływało prostopadle do toru ziarna przesuwanego się pod wpływem sił grawitacji. Natężenie przepływu ziarna regulowane było urządzeniem wygarniającym. Temperaturę czynnika suszącego mierzono specjalnymi termoparami suchą i moką $t_1 - t_8$. Wewnątrz komory suszenia zamontowano kilka strun wzdłuż których przesuwały się termopary ziarna. Wynik notowany był na rejestratorze.

Przyjęte założenia upraszczające

1. Skurcz objętościowy ziarna podczas całego procesu suszenia jest nieistotny i zostaje pominięty.

2. Nie istnieje gradient temperatury wewnątrz cząstki ziarna.

3. Pomija się wpływ kontaktowej wymiany ciepła między ziarnami.

4. Obudowa ścian jest adiabatyczna o nieistotnej pojemności cieplnej.

5. Parametry termofizyczne i zawartości wody poszczególnych cząstek w elementarnych objętościach są jednorodne.

6. Tory cząstek są prostoliniowe.

7. Rozkład prędkości przepływu powietrza jest prostopadły do toru cząstek oraz jednakowy wzdłuż wysokości kolumny w tych samych przekrojach.

Symulacja procesu nagrzewania ziarna na modelu matematycznym

Dobry opis matematyczny pozwala na przewidzenie rozkładu temperatur czynnika suszącego i materiału suszonego w komorze, bez konstruowania suszarki. Oto przykładowa symulacja procesu nagrzewania ziarna w kolumnie suszarki przepływowej.

Do obliczeń i weryfikacji przyjęto ziarno kukurydzy KB-270 o następujących parametrach:

1. Zastępcza średnica ziarna $d_e = 0,0087$ m.

2. Ciepło właściwe suchej masy kukurydzy Kb-270 $c_s = 0,35 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$.

3. Ciepło właściwe ziarna wilgotnego $c = 0,35 + u = 0,77 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{K}$.

4. Początkowa wilgotność ziarna $w_0 = 32,4\%$.

5. Porowatość warstwy ziarna $\varepsilon = 0,48$, wg [2].

Stosowane parametry suszenia:

1. Temperatura powietrza na wlocie do komory suszenia $t_{Go} = 41,6^{\circ}\text{C}$.
2. Masowe natężenie przepływu powietrza $\dot{m}_p = 391,0 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$.
3. Prędkość przepływu powietrza na wejściu $v_o = 0,097 \text{ m/s}$.
4. Temperatura otoczenia $t_{ot.s.} = 12^{\circ}\text{C}$.
5. Temperatura otoczenia termometru mokrego $t_{ot.m.} = 6,6^{\circ}\text{C}$.
6. Temperatura początkowa ziarna $t_{Mo} = 12^{\circ}\text{C}$.
7. Natężenie przepływu ziarna opuszczającego komorę suszenia $\dot{M}_z = 132 \text{ kg/h}$.

Cechy fizyczne powietrza suszącego (wielkości tabelaryczne):

1. Gęstość powietrza na wlocie do komory suszenia $\rho_p = 1,12 \text{ kg/m}^3$.
2. Ciepło właściwe $c_p = 0,24 \text{ kcal/kg} \cdot \text{deg}$.
3. Średnia lepkość kinematyczna powietrza w warstwie $\gamma = 16,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.
4. Średnia przewodność cieplna powietrza w warstwie (dla $t = 30^{\circ}\text{C}$) $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ($1 \text{ kcal} = 4,19 \text{ kJ}$).

Przyrost średnicy suszarki od $D_o = 0,25 \text{ m}$ do $D_K = 0,55 \text{ m}$ powodował zmianę prędkości przepływu czynnika suszącego na promieniu od $0,097 \text{ m/s}$ do $0,02 \text{ m/s}$ dla stałego wydatku wentylatora.

Liczba Reynoldsa zmieniała się w zakresie:

$$Re = \frac{v \cdot d_e}{\gamma} = 50 \div 10,3 \quad (20)$$

Współczynnik wnikania ciepła obliczono z iloczynu liczb bezwymiarowych na podstawie wzoru wg [1] dla liczb Reynoldsa $20 < Re \leq 200$

$$Nu = 0,106 Re = 0,106 \cdot 50 = 5,3 \quad (21)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e} = 14 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}} = 58,6 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}} \quad (22)$$

Ze względu na niezwykle żmudne i uciążliwe obliczenia proces weryfikacji przeprowadzono tylko dla jednej warstwy, przylegającej do przewodu centralnego o przyroście promienia $\Delta r = 30 \text{ mm}$. Przyjęto, że współczynnik α na grubości takiej elementarnej warstwy był stały.

Objętościowy współczynnik wnikania ciepła określono z zależności:

$$(a\alpha) = \frac{6(1 - \epsilon)\alpha}{d_e} \quad (23)$$

I dla takiej warstwy wynosił $(a\alpha) = 1,4 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} = 5,87 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$.

Współczynnik $\psi = \frac{\Delta q_t}{\Delta q_d}$ określono na podstawie liczb kryterialnych Biota Bi , Fouriera Fo , bezwymiarowej temperatury θ oraz równania krzywej suszenia dla cienkiej warstwy U_{red} [9].

Korzystając z równania (17) oraz wprowadzając następujące dane konstrukcyjne suszarki:

- promień przewodu centralnego $r_0 = 0,125 \text{ m}$,
- wysokość całkowita kolumny $h = 1,5 \text{ m}$,

obliczono temperaturę czynnika suszącego po przejściu przez elementarną objętość 1.1. (rys. 2).

Siatkę kroku przejścia przyjęto następująco:

$$\Delta r = \Delta y = 0,03 \text{ m} \quad (\text{równe } \sim 3 d_e)$$

Δr - krok po promieniu,

Δy - krok po wysokości warstwy.

Założono, że cała elementarna objętość jest pod działaniem temperatury powietrza t_{G0} przez pewien odcinek czasu i następnie przesunięta skokowo w nowe warunki. Dlatego upraszczając zagadnienie nie obliczono średniej temperatury t_{Gij} oraz t_{Mij} , lecz przyjmowano (przed wejściem w nowe parametry) zawsze stan poprzedni symulując w ten sposób proces.

Dokładność pomiarów i błędy obliczeniowe

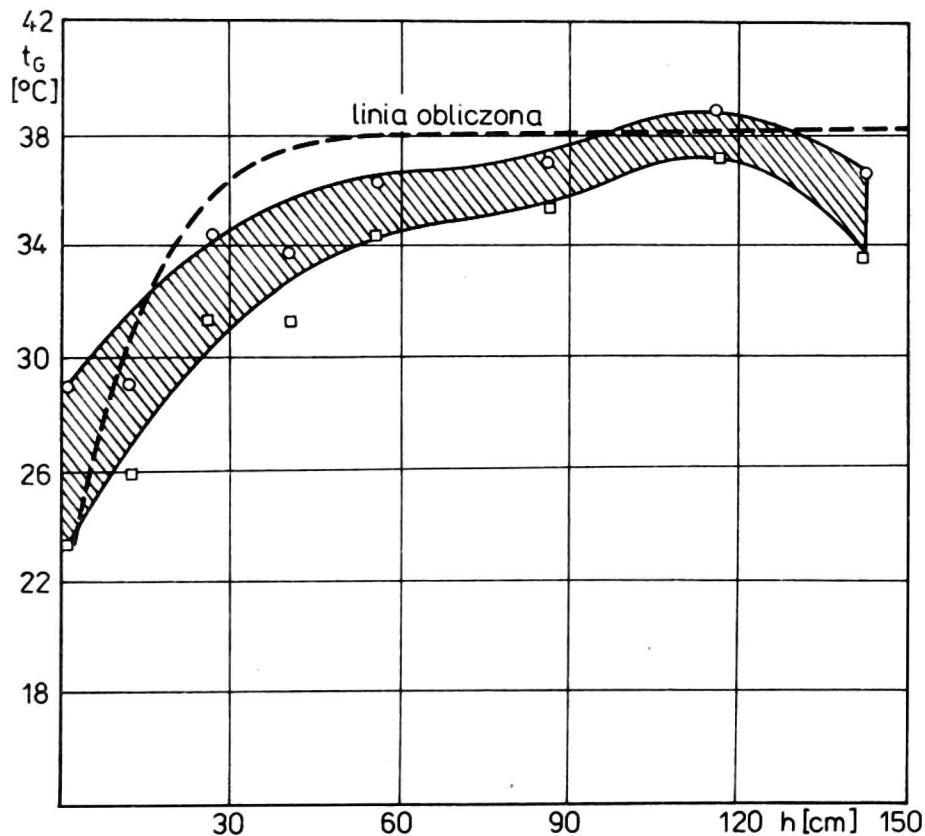
Błędy wyników złożonych określono metodą rachunku różniczkowego

		Błąd %
Prędkość przepływu powietrza		
$v_p = \sqrt{\frac{2 P_d}{\rho}} \cdot 0,015$	∂v	0,64
Masowe natężenie przepływu ziarna		
$\dot{M} = \frac{m}{\tau} Z$	∂M	0,184
Średnica zastępcza ziarna		
$d_e = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{1000}}{\pi \cdot Z_{1000}}}$	∂d_e	0,08

Liczba Reynoldsa $Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$	∂Re	0,724
Objętościowy współczynnik wnikania ciepła		
$(a\alpha) = \frac{6 \cdot \gamma_u \cdot 0,106 \cdot v \cdot \lambda}{d_e \cdot \gamma_u \cdot \nu}$	$\partial(a\alpha)$	0,888
Współczynnik nagrzewania się ziarna		
$\psi = \frac{\dot{M} \cdot c \cdot \Theta \cdot (t_{Go} - t_{Mo})}{\dot{M} \cdot c \cdot \Theta \cdot (t_{Go} - t_{Mo}) + \dot{M}_s \cdot \partial u \cdot 60}$	$\partial \psi$	0,32
Błąd obliczeniowy temperatury powietrza	∂t_G	3,8
Błąd obliczeniowy temperatury ziarna	∂t_M	5,6

Porównanie wyników doświadczeń z modelami matematycznymi

Wyniki obliczeń dla pierwszej warstwy przedstawiono na wykresach (rys. 4, 5) w postaci linii przerywanych, na które nanie-

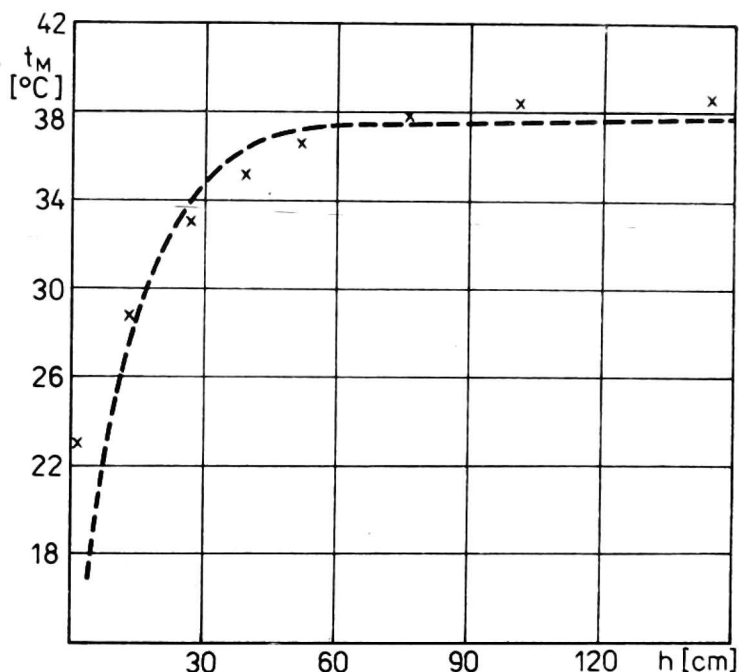


Rys. 4. Weryfikacja temperatury czynnika suszącego t_G [°C] po przejściu warstwy ziarna o grubości 30 mm w funkcji wysokości suszarki h [cm]. Parametry suszenia podane w tekście

siono punkty otrzymane z pomiaru. Rysunek 4 dotyczy zmian temperatury czynnika suszącego wzdłuż wysokości warstwy, w odległości od sita wewnętrznego równej 30 mm.

Punkty oznaczone kółeczkami podają temperaturę zmierzona w odległości ~ 20 mm od przewodu centralnego, punkty zaś oznaczone kwadratami ~ 35 mm. Na rysunku zakreskowano obszar w jakim powinna znaleźć się krzywa otrzymana na podstawie modelu matematycznego. Istnieją pewne rozbieżności między temperaturami czynnika suszącego obliczonymi a określonymi doświadczalnie. Rozbieżności te wynikają z przyjętych uproszczeń.

Rysunek 5 przedstawia porównanie rzeczywistych zmian temperatury ziarna wzdłuż wysokości kolumny z wynikami uzyskanymi z symulacji suszenia. Punkty zaznaczone krzyżykami pokazują zmierzona temperaturę ziarna w miejscu odległym o 25 mm (± 5 mm) od przewodu centralnego. Krzywa kreskowana podaje wartość temperatury warstwy ziarna o grubości $\Delta r = 30$ mm obliczoną według równania matematycznego. Widać dużą zgodność pomiarów z modelem matematycznym.



Rys. 5. Weryfikacja temperatury warstwy ziarna t_M [°C] w funkcji wysokości suszarki h [cm]. Parametry suszenia podane w tekście

WNIOSKI

1. Sformułowany model matematyczny symuluje rzeczywisty proces nagrzewania ziarna z dokładnością dostateczną do obliczeń praktycznych.

2. Przyjęte założenia upraszczające ułatwiają obliczenia, jednakże mogą prowadzić do dużych błędów. Największa dokładność dotyczy warstw najbliższych przewodu centralnego.

LITERATURA

1. Gorbis Z. R.: Tęplóobmien dispersnych skwoznych potokow. Moskwa 1960.

2. Kamiński E.: Teoria i technologia suszenia kukurydzy. Praca habilitacyjna wykonana w Instytucie Mechanizacji Rolnictwa A. R. we Wrocławiu 1979.
3. Kamiński E.: Badania wstępne suszarki SZ-5 w zastosowaniu do nasion bobiku i peluszkii oraz kukurydzy konsumpcyjnej. Rocz. Nauk Rol., t. 70-C-4, 1974.
4. Ledwoń K.: Wykorzystanie ciepła podczas suszenia ziarnistych produktów rolniczych w modelu suszarki pracującej według zasady prądu skrzyżowanego. Praca doktorska wykonana w Instytucie Mechanizacji Rolnictwa A. R. we Wrocławiu, 1977.
5. Łytkow A. W.: Jawlenia pierienosa w kapilarno-poristych tiełach. Moskwa 1954.
6. Pabis S.: Konwekcyjne suszenie w przeciwwprądzie warstwy materiałów ziarnistych. Rocz. Nauk Rol., Seria C, t. 68, z. 4.
7. Pabis S.: Metodologia modelowania systemów. Skrypt. Wykład wygłoszony na szkole „Modelowania i symulacja komputerowa systemów techniki rolniczej”, Jabłonna 16-21. X. 1978.
8. Research Report 224 January 1974 Grain dryer simulation.
9. Wymiana ciepła i masy rozdrobionych ciał w złożach nieruchomych i ruchomych w procesach suszenia płodów rolnych oraz suszenia i granulowania pasz. Etap IV 1980. Maszynopis w Instytucie Mechanizacji Rolnictwa A. R. we Wrocławiu.

Стефан Цэнковски

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНЫ В КОЛОННО-ГРАВИТАЦИОННОЙ СУШИЛКЕ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ПРИНЦИПУ КРЕСТОВОГО ТОКА. ЧАСТЬ I

Р е з ю м е

Статья представляет математическую модель описания процесса теплообмена, основывающегося на общепринятых законах физики. Математический анализ основан на итерационном методе.

В процессе сушки, происходящем без потерь тепла, тепло, поставляемое сушильным агентом (q_d), потребляется на нагрев элементарного объёма (q_t), а также на испарение воды из этого объёма (q_r) $q_d = q_t + q_r$.

Это уравнение после развития и соответствующих преобразований позволило на математическое описание распределения температур сушильного агента, высушиваемого материала, в произвольном пункте камеры сушки.

Чтобы подтвердить правильность математических уравнений была произведена серия измерений на специально с этой целью сконструированной стенде, а результаты были сравнены с расчётами.

Stefan Cenkowski

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT EXCHANGE IN GRAVITY-COLUMN DRIER
WORKING ON PRINCIPLE OF CROSSING FLOW. PART I. FORMULATING OF
MATHEMATICAL MODEL AND ITS VERIFICATION

S u m m a r y

Mathematical description of heat exchange process basing on general physical laws is presented in the paper. Mathematical analysis was founded on an iterative method.

In the process of drying following without any heat losses, the heat supplied by drying agent (q_d) is used for heating an elementary volume (q_t) and for water evaporation from this volume (q_r): $q_d = q_t + q_r$.

After expansion and adequate transformation of such equation a mathematical description of temperature distribution for the drying agent and for dried material at any point of drying chamber was possible.

To confirm the pertinence of mathematical equations a series of measurements was carried out using specially designed testing rig; the results of measurements were compared with calculations.