

MATEMATYCZNY MODEL WYMIANY CIEPŁA
W SUSZARCE KOLUMNOWO-GRAWITACYJNEJ
PRACUJACEJ WEDŁUG ZASADY PRĄDU SKRZYŻOWANEGO

CZĘŚĆ II. OKREŚLENIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA
WYKORZYSTANIA CIEPŁA NA NAGRZEWANIE ZIARNA ψ

Stefan Cenkowski

Instytut Mechanizacji Rolnictwa AR we Wrocławiu

WSTĘP

W części I artykułu pod tym samym tytułem [2] przedstawiono opis matematyczny rozkładu temperatur czynnika suszącego oraz ziarna w komorze suszarki grawitacyjnej bazujący na ogólnie przyjętych prawach fizyki. Przedstawiono również weryfikację równań matematycznych. W obliczeniach przedstawionych w części I posłużono się współczynnikiem nagrzewania się ziarna ψ jako stosunkiem ilości ciepła pobranego na nagrzewanie się ziarna q_t do całkowitego ciepła pochłoniętego przez to ziarno q_d , $\psi = \frac{q_t}{q_d}$. Dla materiału wilgotnego ciepło q_d przedstawiono jako sumę ciepła, które posłużyło do nagrzewania ziarna oraz ciepła, które zużyto na odparowanie wody z tego materiału q_r .

$$q_d = q_t + q_r$$

Część II bazując na przykładzie obliczeniowym z części pierwszej przedstawia metodę dedukcyjną i empiryczną określenia współczynnika ψ .

OKREŚLENIE WSPÓŁCZYNNIKA ψ NA BAZIE LICZB KRYTERIALNYCH

Rozpatrzono pojedyncze ziarno jako kulę o średnicy zastępczej $d_e = 0,0087$ m i temperaturze początkowej $t_{M0} = 12^\circ\text{C}$. W chwili $\tau = 0$ ziarno to zostaje przeniesione do ośrodka o stałej temperaturze $t_{G0} = 41,6^\circ\text{C}$. W celu uproszczenia zagadnienia założono, że powierzchnia ziarna nagrzewa się tak samo jak jego ośrodek. Wymiana ciepła między powierzchnią ziarna i otoczeniem odbywa się na

zasadzie przejmowania ciepła przy średnim współczynniku $\alpha = 11 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K} = 46,1 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}}$ dla pierwszej warstwy ziarna.

Liczba Biota Bi wynosi:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_m} = \frac{11 \cdot 0,00435}{0,26} = 0,18 \quad (1)$$

gdzie:

R - promień zastępczy ziarna [m],

λ_m - współczynnik przewodzenia ciepła wg [4] [kcal/m·h·K].

Liczba Fouriera Fo

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2} \quad (2)$$

gdzie:

τ - czas [s],

a - współczynnik dyfuzji ciepła wg [2] $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$.

$$a = 8,889 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

na podstawie literatury [5] określono temperatury bezwymiarowe Θ

$$\Theta = \frac{t_M(\tau) - t_{Mo}}{t_{Go} - t_{Mo}} \Rightarrow t_M(\tau) = \Theta (t_{Go} - t_{Mo}) + t_{Mo} \quad (3)$$

Wyniki obliczeń zebrano w tabeli 1.

T a b e l a 1

τ [min]	Fo(τ)	Bi	Θ (τ)	$t_M(\tau)$ [$^{\circ}\text{C}$]
6	1,7		0,54	28,2
12	3,4	0,18	0,77	35,1
18	5,1		0,90	39,0
24	6,8	0,18	0,95	40,5
30	8,5		0,97	41,1
36	10,1	0,18	0,98	41,4
42	11,8		0,99	41,7
48	13,5	0,18	0,995	41,85
54	15,2	0,18	0,997	41,9

Założenie badawcze I

Krzywe suszenia wyodrębnionego elementu warstwy ruchomej można opisać tymi samymi równaniami, jakie opisują krzywe suszenia pojedynczego ziarna. Wymiary takiego elementu powinny odpowiadać wymiarom tak zwanej cienkiej warstwy, które według literatury i doświadczeń własnych nie powinny przekraczać wymiaru trzech średnic zastępczych ziarna.

Dla pojedynczego ziarna i cienkiej warstwy Kamiński [3] podaje równanie krzywej suszenia w postaci:

$$U_{\text{red}} = A \cdot e^{-K \cdot \tau} \quad (4)$$

gdzie wielkości A i K określono doświadczalnie. Pozwala to na obliczenie $u(\tau)$, gdyż z drugiej strony

$$U_{\text{red}} = \frac{u(\tau) - u_r}{u_o - u_r} \quad (5)$$

gdzie: u_r - wilgotność równoważna.

Łącząc proces nagrzewania i odparowania wilgoci z ziarna określono stosunek ciepła, które posłużyło do nagrzewania, do ciepła całkowitego pochłoniętego przez ziarno określając to współczynnikiem ψ [1]. Można napisać, że:

$$\psi(\tau) = \frac{\dot{M} \cdot c [t_M(\tau) - t_{M0}]}{\dot{M} \cdot c (t_M(\tau) - t_{M0}) + \dot{M}_s \cdot (u_o - u(\tau)) \cdot (595 + 0,46 t_M(\tau))} \quad (6)$$

Obserwacje zmian temperatury ziarna podczas przechodzenia przez komorę suszenia suszarki kolumnowo-grawitacyjnej (porównaj rys.5), wykazują istnienie dwu stref: pierwszej - w której zachodzi przede wszystkim nagrzewanie się ziarna i drugiej - w której wzrost temperatury materiału jest nieznaczny. Oczywiście w przypadku suszarki grawitacyjnej, w zależności, w jakiej odległości od sita wewnętrznego przesuwają się pojedyncze ziarno, długość tych stref ulega zmianom. Ponieważ we wzorze (6) występuje temperatura ziarna $t_M(\tau)$ można postawić następujące założenie badawcze.

Założenie badawcze II

"Współczynnik ψ jest wielkością zmienną. Charakter zmian tego współczynnika odpowiada charakterowi zmian temperatury ziarna.

Ponieważ charakter zmian temperatury zależy od wielkości cieplnych i dyfuzyjnych ziarna, można więc stwierdzić, że $\psi = f(Bi, Fo, Fo_m)$ ".

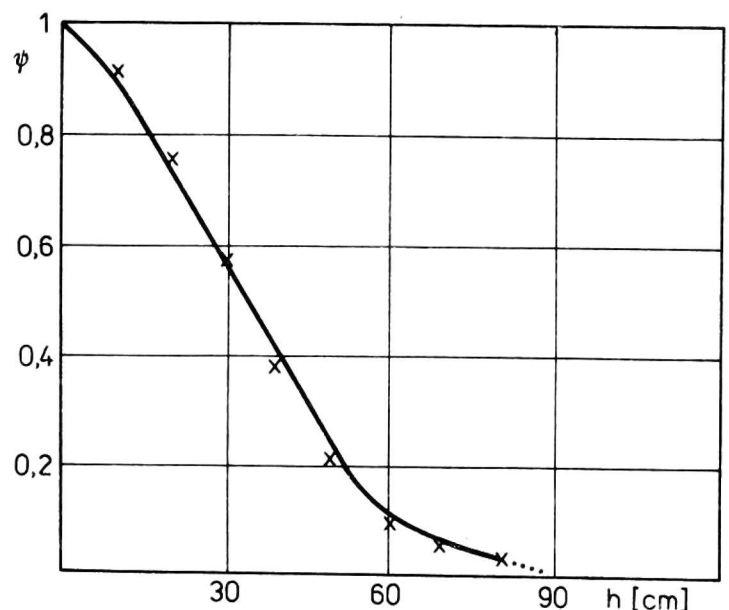
Dla obliczenia współczynnika ψ całą wysokość komory podzielono na odcinki 10 cm. Przy założonym masowym natężeniu przepływu ziarna przez badany model suszarki czas przebywania w takim odcinku wynosi 6 minut.

Tabela 2 podaje obliczone wartości: $U_{red}(\tau)$ ze wzoru (4) $u(\tau)$ ze wzoru (5) i $\psi(\tau)$ ze wzoru (6) dla pierwszej (najbliższej ścianki) pionowej warstwy ziarna. Wielkość A i K we wzorze (4) przyjęto wg Kamińskiego [3] odpowiednio: $A = 1,0056$ i $K = 0,125$ dla temperatury $t = 42^\circ C$.

T a b e l a 2

Głębokość h [cm]	Czas τ [min]	$U_{red}(\tau)$	$u(\tau)$	$\psi(\tau)$
0	0	1	0,479	-
0,1	6	0,993	0,476	0,91
0,2	12	0,981	0,471	0,75
0,3	18	0,968	0,466	0,57
0,4	24	0,956	0,461	0,38
0,5	30	0,9447	0,456	0,21
0,6	36	0,933	0,451	0,1
0,7	42	0,921	0,446	0,06
0,8	48	0,91	0,441	0,03

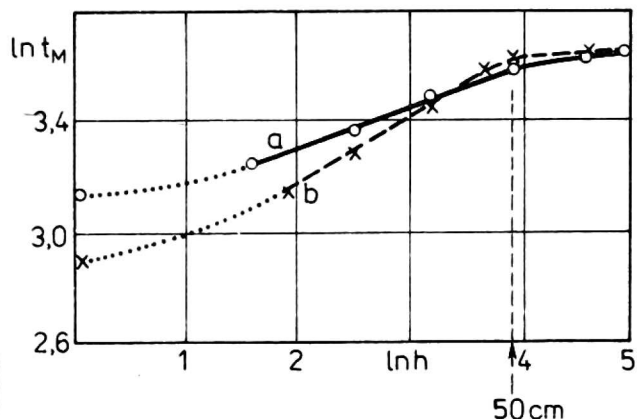
Na rysunku 1 przedstawiono graficznie zależność $\psi = f(h)$. Wykres ten pozwala na określenie wartości ψ na dowolnej wysokości kolumny dla pierwszej pionowej warstwy. Odczytane z wykresu wielkości wstawia się do równania matematycznego opisującego rozkład temperatury czynnika suszącego i ziarna przedstawionego w części I.



Rys. 1. Zależność współczynnika nagrzewania się ziarna ψ od wysokości kolumny h [cm] dla pierwszej warstwy

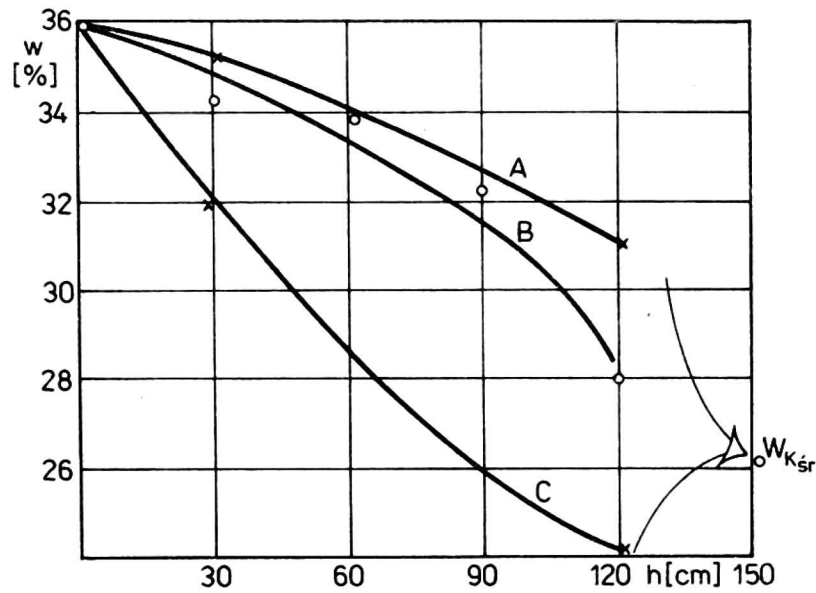
OKREŚLENIE WSPÓŁCZYNNIKA ψ METODĄ GRAFICZNĄ
NA BAZIE POMIARÓW UZYSKANYCH NA STANOWISKU POMIAROWYM

Współczynnik nagrzewania się ziarna można było również określić empirycznie. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowo w układzie podwójnie logarytmicznym zależność temperatury ziarna podczas przechodzenia przez komorę suszarki w odległości 20 ± 5 mm od sita wewnętrznego. Dla pierwszej warstwy funkcja temperatury ziarna składa się z dwóch części. Dlatego też nazwano umownie pierwszą część strefą nagrzewania. Występuje w niej duży wzrost temperatury ziarna. Część drugą funkcji temperatury ziarna nazwano umownie strefą suszenia, gdyż znacznemu spadkowi wilgotności towarzyszy tu nieznaczny wzrost temperatury. Załamanie się prostych dla pierwszej warstwy występuje między 30-50 cm od linii wejścia. Taka obserwacja pozwoliła na obliczenie współczynnika ψ_n strefy nagrzewania się ziarna oraz ψ_s strefy suszenia. Zmiana wilgotności ziarna kukurydzy podczas przechodzenia przez komorę suszenia została przedstawiona w formie wykresu na podstawie jednego wybranego pomiaru (rys. 3). Jak i na przykładowym rysunku 3 tak i we wszystkich pomiarach obserwowano dużą nierównomierność rozkładu wilgotności ziarna na promieniu kolumny suszarniczej. Zdarzało się, że warstwy najdalej położone w początkowej strefie były nawet nawilgacane przez nasycony czynnik suszący. Na rysunku 4 i 5 przedstawiono taki właśnie przykład. Jest to charakterystyczny dla suszarki kolumnowo-grawitacyjnej rozkład temperatury czynnika suszącego i ziarna w komorze. Można tu zaobserwować, że dla warstw najbardziej odległych od sita wewnętrznego w początkowej strefie suszenia istnieje pewien martwy obszar, gdzie jest izomasowy proces wymiany ciepła.



Rys. 2. Rozkład temperatury ziarna t_M wzdłuż wysokości kolumny h w odległości 25 mm od sita wewnętrznego w układzie podwójnie logarytmicznym

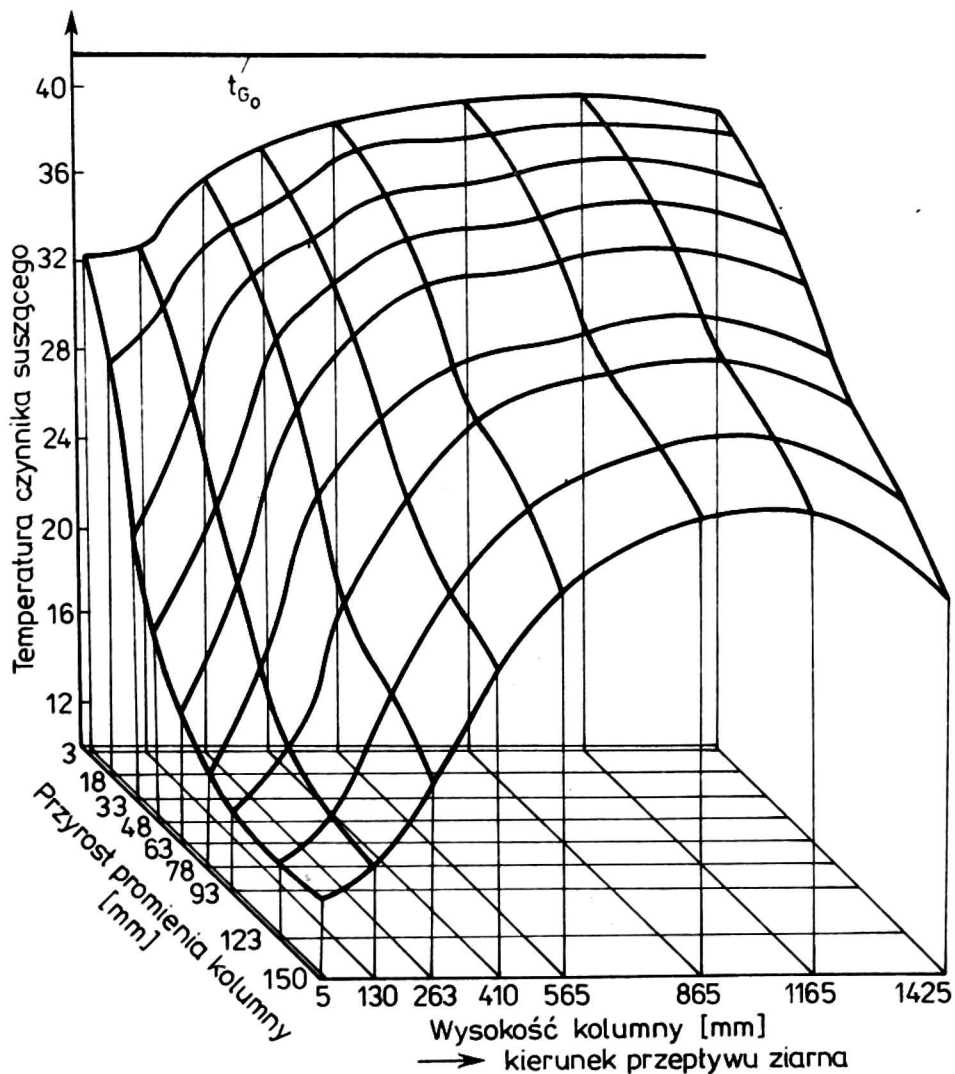
- a) Parametry suszenia: $t_{Go} = 41,6^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}_p = 391 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$
 $t_{Mo} = 12^{\circ}\text{C}$, $w_o = 32,4\%$,
 $\dot{M}_z = 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$
- b) Parametry suszenia: $t_{Go} = 41,5^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}_p = 391 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$
 $t_{Mo} = 3,3^{\circ}\text{C}$, $w_o = 36\%$,
 $\dot{M}_z = 571 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$



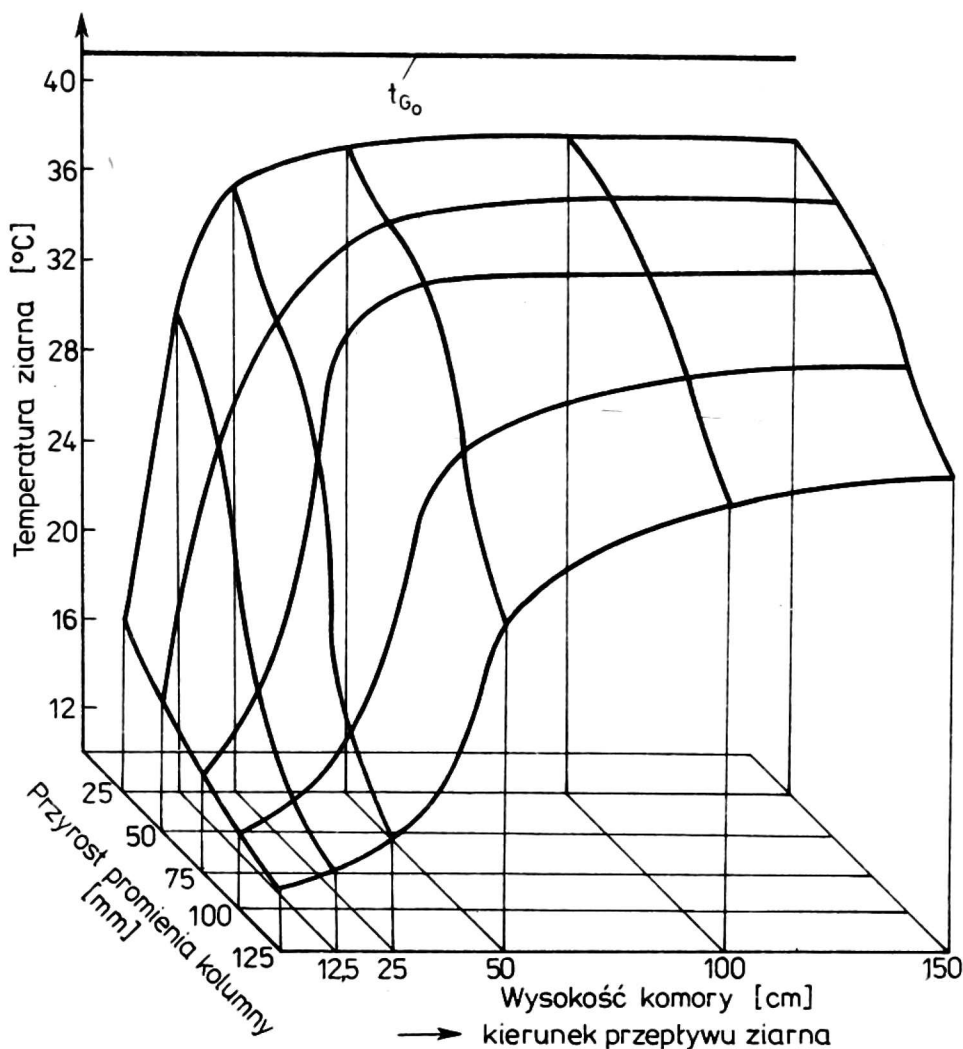
Rys. 3. Ubytki wilgotności w komorze suszarki
 Parametry suszenia: $t_{Go} = 41,6^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}_p = 391 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$,

$$t_{Mo} = 12^{\circ}\text{C}, \quad w_o = 32,4\%, \quad \dot{M}_z = 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}.$$

- A - warstwa ziarna o grubości $\Delta r = 50$ mm przesuwająca się najbliżej sita wewnętrznego,
 B, C - kolejne dalsze warstwy ziarna, każda o grubości $\Delta r = 50$ mm.

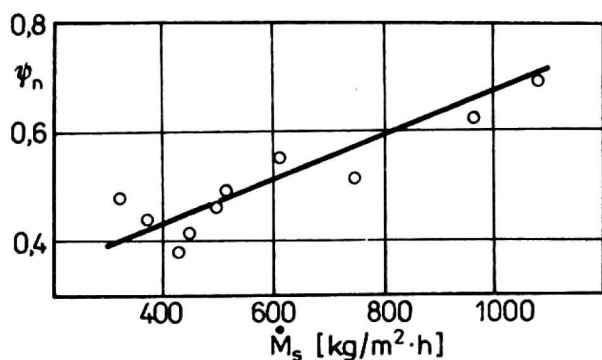


Rys. 4. Rozkład temperatury czynnika suszącego w komorze suszarki grawitacyjnej

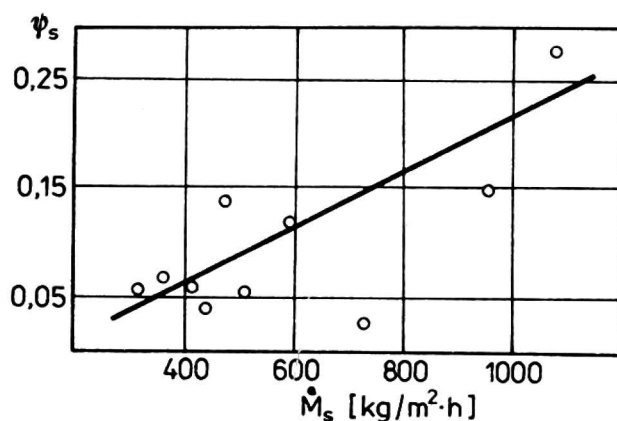


Rys. 5. Rozkład temperatury ziarna w komorze suszarki grawitacyjnej

Korzystając z zależności $w = f(h)$ (np. rys. 3) oraz rozkładu temperatur ziarna w kolumnie i obliczono wartość ψ_n oraz ψ_s uzależniając je od natężenia przepływu suchej masy \dot{M}_s . Wyniki przedstawiono na rysunkach 6 i 7 dla przykładowej prędkości powietrza

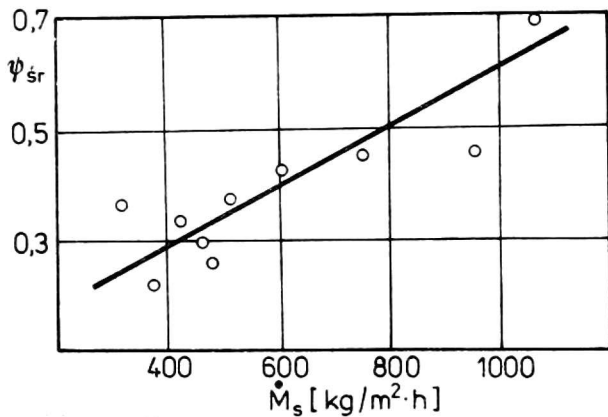


Rys. 6. Zależność współczynnika ψ_n od natężenia przepływu suchej masy $\dot{M}_s \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$



Rys. 7. Zależność współczynnika ψ_s w strefie suszenia od natężenia przepływu suchej masy $\dot{M}_s \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$

około 0,1 m/s. Wzrost natężenia przepływu ziarna powoduje wzrost tych współczynników. Podobnie obliczono ψ_{sr} w funkcji przepływu

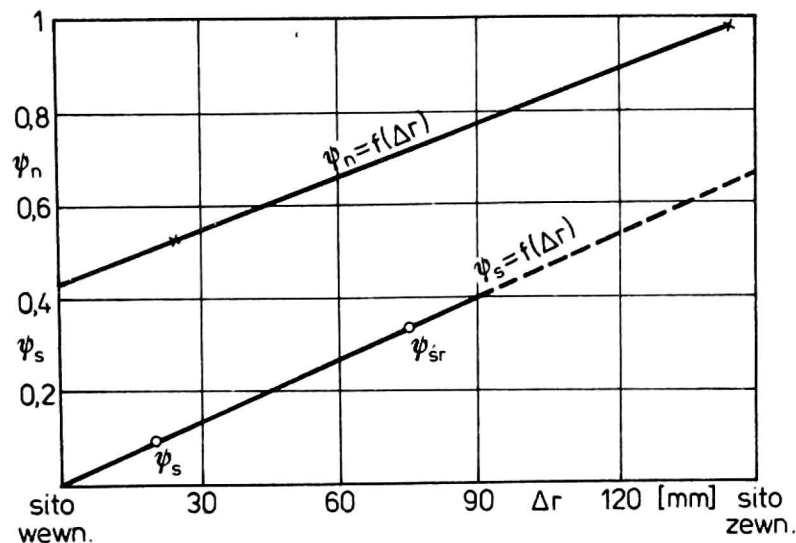


Rys. 8. Zależność współczynnika ψ_{sr} od natężenia przepływu suchej masy \dot{M}_s [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$].

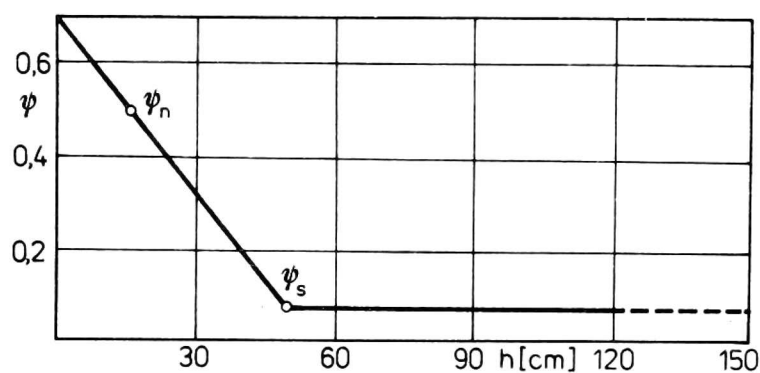
suchej masy dla tych samych pomiarów. W tych obliczeniach uwzględniono parametry ziarna na wejściu i wyjściu z suszarki. Wynik obliczeń przedstawiono na wykresie (rys. 8).

Na podstawie tych zależności i stosując uproszczenia określono w postaci funkcji liniowej zmianę współczynników ψ_n oraz ψ_s na promieniu w sposób następujący. Dla wybranego przepływu masowego $\dot{M}_s = 420 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ określono wartość $\psi_n =$

$= 0,48$ w odległości 20 ± 5 mm od sita wewnętrznego (wybrano takie same natężenie przepływu suchego ziarna \dot{M}_s jak przy obliczaniu współczynnika $\psi(\tau)$ określonego na bazie liczb kryterialnych w celu porównania tych dwóch sposobów). We wszystkich pomiarach pojawiła się na wejściu do suszarki strefa zupełnego nasycenia powietrza, czyli $\psi = 1$ dla $v = 0,1$ m/s w odległości około 100–150 mm od sita wewnętrznego [1]. Te dwa punkty połączono ze sobą, zakładając liniową zależność $\psi_n = f(\Delta r)$ (rys. 9). Podobnie wykreślono



Rys. 9. Określenie wartości współczynników ψ_n i ψ_s w funkcji przyrostu promienia kolumny



Rys. 10. Określenie współczynnika ψ dla pierwszej warstwy $\Delta y = 30$ mm w funkcji wysokości kolumny

no zależności $\psi_s = f(\Delta r)$, przy czym jeden punkt naniesiono na rysunku 7, punkt drugi zaś przyjęto jako średnią wartość współczynnika ψ_{sr} (rys. 8). Wartość ψ w funkcji wysokości kolumny dla pojedynczej cienkiej warstwy określono na podstawie wartości średniej ψ_n i ψ_s dla warstw o grubości $\Delta y = 0,03$ m, $\psi_n = 0,47$ i $\psi_s = 0,07$ (rys. 9). Wartość ψ_n była średnią dla warstwy o wysokości 30 cm. Punkt został naniesiony na wykres w połowie tej wysokości (15 cm). Sugerując się pomiarami, wartość ψ_s naniesiono w odległości 50 cm (rys. 10). Widać, że przedstawiona zależność jest podobna w swojej charakterystyce do obliczeń teoretycznych (porównaj rys. 1), ponieważ w rzeczywistości ziarno nagrzewa się od penetrującego czynnika suszącego przed wejściem na linię perforacji suszarki. Stąd praktycznie wartość ψ_n jest mniejsza od 1.

WNIOSKI

1. Analiza współczynnika nagrzewania się ziarna ψ pozwala na podzielenie całej komory suszarki na strefę nagrzewania i strefę suszenia, przy czym współczynnik ten jest funkcją $\psi = f(Bi, Fo, Fo_m)$.

2. Dla suszarki grawitacyjnej konstruowanej według zasady maksymalnego wykorzystania ciepła zawsze istnieje część komory suszenia, w której wymiana ciepła odbywa się przy całkowitym nasyceniu powietrza, tzn. strefa, gdzie współczynnik $\psi = 1$.

LITERATURA

1. Cenkowski S.: Analiza procesu suszenia ziarna zbóż w suszarkach grawitacyjnych działających na zasadzie prądu skrzyżowanego. Praca doktorska wykonana w Instytucie Mechanizacji Rolnictwa Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1981.
2. Cenkowski S.: Matematyczny model suszenia w suszarce kolumnowo-grawitacyjnej pracującej według zasady prądu skrzyżowanego.

- Cz. I. Sformułowanie modelu matematycznego i jego weryfikacja. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., z. 287.
3. Kamiński E.: Teoria i technologia suszenia kukurydzy. Praca habilitacyjna wykonana w Instytucie Mechanizacji Rolnictwa Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1979.
 4. Papers II International conference on physical properties of Agricultural materials Gödöllő 1980.
 5. Tomczak W., Halupczok J., Mrozowska L.: Wymiana ciepła. Tabele i wykresy. Skrypt Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1971.

Стефан Цэнковски

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В КОЛОННО-ГРАВИТАЦИОННОЙ СУШИЛКЕ,
РАБОТАЮЩЕЙ ПО ПРИНЦИПУ КРЕСТОВОГО ТОКА.

ЧАСТЬ II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОИМОСТИ КОЭФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ
ДЛЯ НАГРЕВАНИЯ ЗЕРНА ψ

Р е з ю м е

Коэффициент использования теплоты для нагревания зерна является отношением использованной теплоты для нагревания продукта к интегральной теплоте $\psi = \frac{dq_t}{dq_d}$. В статье автор предлагает два метода определения этого коэффициента. Первый - дедукционный на основе критериального числа, Biota Bi , Fouriera FO , безразмерной температуры θ , а также уравнения кривой сушения тонкому слою зерна u_{red} и вторая в основном пользуется измерениями, которые сделано на исследовательском месте. Результаты этих двух методов были представлены в диаграммах а также сравнены.

Stefan Cenkowski

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT EXCHANGE IN GRAVITY-COLUMN
DRIER WORKING ON PRINCIPLE OF CROSSING FLOW.

PART II. DETERMINATION OF HEAT UTILIZATION COEFFICIENT VALUE
 ψ FOR CORN HEATING

S u m m a r y

Heat utilization coefficient ψ for corn heating is described as the differential ratio of heat used for heating of product dq_t to the total value of heat used in this process dq_d

$$\psi = \frac{dq_t}{dq_d}$$

In the article two methods for determination of this coefficient are proposed. First one, the deduction method based on criterial numbers Biot's Bi and Fourier's Fo , reduced temperature θ and equation of drying curve for the thin layer of corn U_{red} ; a second one based on experimental data taken from the research on testing rig. Results of this two methods were compared and presented in the figures.