

Maria Głowacka, Jerzy Malczewski

Poitechnika Warszawska, Filia w Płocku

## SUSZENIE FLUIDYZACYJNE W OSCYLUJĄCEJ TEMPERATURZE

W pracy przedstawiono wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych procesu suszenia w oscylującej temperaturze gazu. Model teoretyczny procesu został rozwiązany analitycznie, a następnie zweryfikowany eksperymentalnie. Przebadano wpływ parametrów  $\omega$  i  $\nu$  na proces. Wykazano, że suszenie w oscylującej temperaturze jest oszczędniejsze energetycznie w porównaniu z procesem izotermicznym.

### OZNACZENIA

a	- współczynnik dyfuzji ciepła	$m^2 \cdot s^{-1}$
$a_m$	- współczynnik dyfuzji masy	$m^2 \cdot s^{-1}$
c	- ciepło właściwe wilgotnego materiału	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
H	- wysokość warstwy nieruchomego zioła	m
k	- współczynnik wnikania masy	$(kg \text{ s. p.}) \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
r	- współrzędna promieniowa	m
r'	- ciepło parowania wody	$J \cdot kg^{-1}$
R	- promień kuli	m
t	- temperatura ciała stałego	K
T	- temperatura gazu	K
u	- zawartość wody	$kg \text{ H}_2\text{O} \cdot (kg \text{ s. m.})^{-1}$
w	- prędkość gazu w przekroju wolnym aparatu	m/s
X	- bezwzględna wilgotność gazu	$kg \text{ H}_2\text{O} \cdot (kg \text{ s. p.})^{-1}$

$\alpha$	- współczynnik wnikania ciepła	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\delta$	- współczynnik termogradientny	$K^{-1} (kg H_2O) (kg s.m.)^{-1}$
$\varepsilon$	- współczynnik przemiany fazowej	
$\delta$	$= \tau_{ch} / \tau_{og}$ - stosunek czasów chłodzenia do ogrzewania w jednym okresie zmian temperatury gazu	
$\lambda$	- współczynnik przewodzenia ciepła	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\rho$	- gęstość	$kg \cdot m^{-3}$
$\omega$	- częstotliwość zmian temperatury	$rad \cdot s^{-1}$

### Indeksy

g	- gaz
ch	- chłodny
śr	- średnia
m	- amplituda
o	- początkowy
og	- ogrzewany
r	- równowagowy
s	- suchy

## 1. WSTĘP

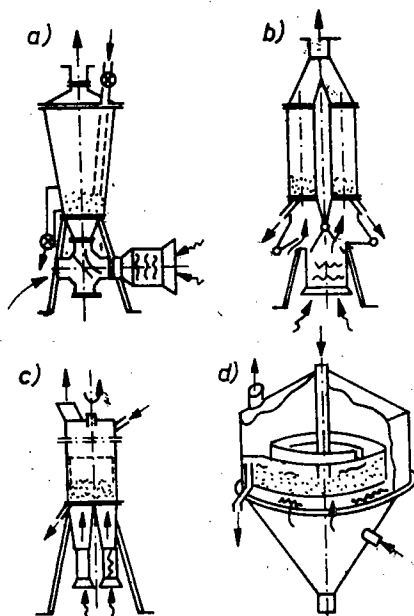
W suchym ciele stałym poddany działaniu periodycznie zmiennej temperaturze zewnętrznej ustala się po pewnym czasie również periodycznie zmienne pole temperatury. Podczas stanu quasi-stacjonarnego nie ma efektywnej wymiany między ciałem a otoczeniem (bilansowanej na odcinkach czasu każdego okresu). Znane jest ogólne rozwiązanie nieustalonego pola temperatury w kuli, cylindrze i płycie w funkcji czasu i współrzędnych położenia [1,2]. Natomiast w materiale wilgotnym pola temperatury i wilgotności nie osiągają w tych warunkach periodycznej powtarzalności. W zwykłych warunkach operacji suszenia materiałów stale schnie. Pole temperatury i wilgotności wzajemnie na siebie oddziałują.

Zastosowanie oscylacji temperatury w zakresie częstotliwości 1/15 do 1/180 Hz jest korzystne ze względu na mniejsze zużycie energii w procesie suszenia w stosunku do innych metod [3,4]. Wyjaśnić to można następująco:

- współczynnik dyfuzji wody jest wykładniczą funkcją temperatury; w okresach przepływu gazu gorącego wzrasta, powodując wzrost przenoszonego strumienia masy wilgoci;
- w okresach przepływu powietrza zimnego zmniejsza się niekorzystny wpływ strumienia wody skierowany do wnętrza materiału, wywołany gradientem temperatury;
- zmniejsza się wpływ niekorzystnych zjawisk związanych z przegrzewaniem powierzchni ziarna, jak: zwięźnienie porów i kapilar, przemieszczenie się strefy odparowania do wewnątrz materiału itp.

Rozwiązania konstrukcyjne suszarek fluidyzacyjnych, w których realizowane są procesy w oscylującej temperaturze, przedstawia rys. 1. W aparatach typu a) i b) materiał pozostaje w

Rys.1. Suszarki fluidyzacyjne pracujące z gazem o oscylującej temperaturze



tej samej komorze a zmieniają się strumienie gazu gorącego i chłodnego, w c) i d) materiał jest przemieszczany do odpowiednich stref o ustalonych przepływach gazu gorącego i chłodnego.

## 2. MATEMATYCZNA ANALIZA PROCESU

Jednoczesną wymianę ciepła i masy w kapilarno-porowatym wilgotnym materiale opisują równania [2]:

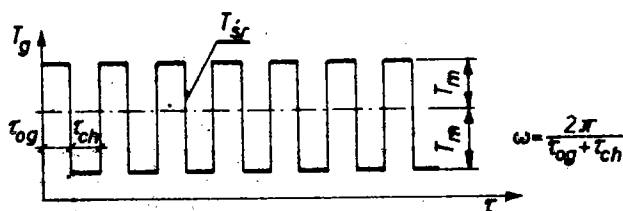
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \varepsilon \frac{r'}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t \quad (2)$$

Przyjmując założenia, że współczynnik przemiany fazowej  $\varepsilon = 0$ , współczynniki dyfuzji ciepła  $a$  i masy  $a_m$  mają wartości stałe oraz że materiał suszony ma kształt kulisty, równania (1) i (2) można przekształcić do postaci:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial \tau} = a_m \left[ \frac{\partial^2 u(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial r} \right] + \\ + a_m \delta \left[ \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] \end{aligned} \quad (4)$$



Rys.2. Przebieg temperatury gazu w procesie suszenia

Zastosowaną zmienność temperatury gazu  $T_g$  w czasie przedstawiono na rys.2.

$$T_g = T_{sr} + \frac{4 \cdot T_m}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin [(2k-1)\omega\tau]}{2k-1} \quad (5)$$

Równania transportu (3) i (4) oraz warunki jednoznaczności zestawiono w tabl.1. Warunki graniczne III rodzaju opisują bilans energii i masy na powierzchni ciała.

$$\alpha [T_g - t(R, \tau)] = \lambda \left. \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R} + k_x r' [X(R, \tau) - X_g] \quad (6)$$

Po wprowadzeniu zależności przedstawiającej temperaturę gazu (5) i zastąpieniu  $\Delta X$  przez  $\Delta u$ , otrzymano warunek brzegowy w postaci przedstawionej w tabl.1.

Podobnie z bilansu masy na powierzchni kuli:

$$-a_m \rho_s \left. \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R} - a_m \rho_s \delta \left. \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R} = k_x [X(R, \tau) - X_g] \quad (7)$$

otrzymano drugi warunek brzegowy.

Układ równań stanowiących model (tabl.1) został rozwiązany przy pomocy przekształcenia Laplace'a. Otrzymano zależności opisujące pola temperatury i zawartości wody w kuli w czasie:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{t}(\tau) - t_o}{T_{sr} - t_o} = 1 - \sum_{k=1}^l \frac{1}{2k-1} \left\{ (A_k g_{1k} + B_k h_{1k} \cos [(2k-1)\omega\tau] + \right. \\ \left. + B_k g_{1k} - A_k h_{1k} \sin [(2k-1)\omega\tau] \right\} - \\ + \sum_{n=1}^{\infty} (E_{1n} - E_{2n}) p_{1n} \exp(-\mu_n^2 Fo) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\bar{u}(\tau) - u_{r, sr}}{u_o - u_{r, sr}} = \sum_{k=1}^l \frac{1}{2k-1} \left\{ (A'_k g_{1k} + B'_k h_{1k} + C_k g_{2k} + \right. \\ \left. + D_k h_{2k}) \cos [(2k-1)\omega\tau] + \right. \\ \left. + (B'_k g_{1k} - A'_k h_{1k} + D_k g_{2k} - C_k h_{2k}) \sin [(2k-1)\omega\tau] + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} [(E'_{1n} - E'_{2n}) p_{1n} + (F_{1n} - F_{2n}) p_{2n}] \exp(-\mu_n^2 Fo) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

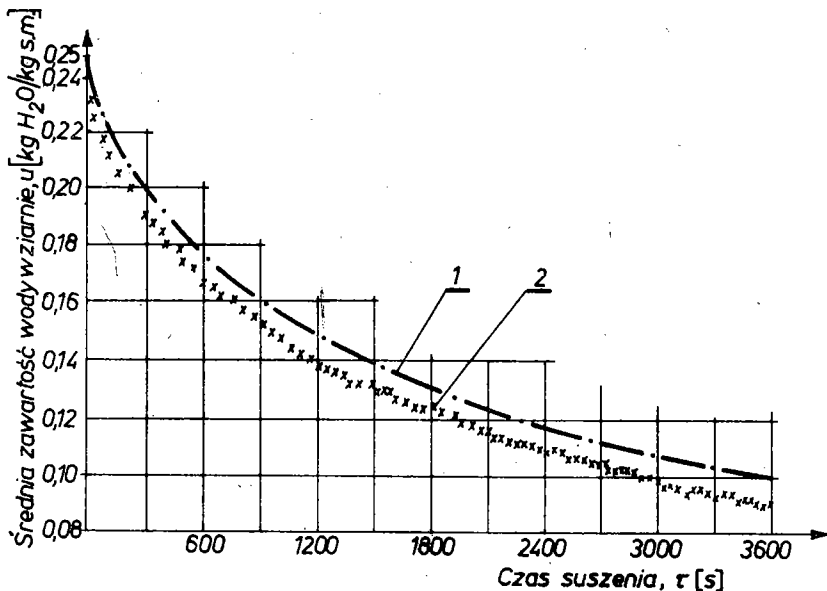
Do opisu procesu suszenia w stałej temperaturze gazu przechodzi się w prosty sposób podstawiając  $T_m = 0$  i  $u_m = 0$ . Przy pomocy maszyny cyfrowej obliczono przebiegi suszenia w

T a b l i c a 1

Matematyczny model suszenia kuli w oscylującej temperaturze gazu

Rodzaj równania	Wyszczególnienie	Równanie
Różniczkowe	Bilans energii cieplnej	$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right]$
równania bilansowe	Bilans masy	$\frac{\partial u(r, \tau)}{\partial \tau} = a_m \left[ \frac{\partial^2 u(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial r} \right] + a_m \delta \left[ \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right]$
	Warunki początkowe	$t(r, \tau) \Big _{\tau=0} = t_0 \quad u(r, \tau) \Big _{\tau=0} = u_0$
Warunki jednoznaczności	Warunki brzegowe dla jednostkowego strumienia energii cieplnej	$-\lambda \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \Big _{r=R} + \left( \alpha + r' k_x \frac{X_g}{P_{nas}} \frac{\partial P_{nas}}{\partial T} \right) \left\{ T_{sr} + \frac{4T_m}{\pi} \sum_{k=1}^l \frac{\sin \left[ \frac{(2k-1)\omega \tau}{2k-1} \right]}{2k-1} - T(T, \tau) \right\}$ $-k_x' \frac{u(r, \tau)}{P_{nas}} \Big _{r=R} - u(r, \tau) - u_{r, sr} + \frac{4u_m}{\pi} \sum_{k=1}^l \frac{\sin \left[ \frac{(2k-1)\omega \tau}{2k-1} \right]}{2k-1} = 0$
	Warunki brzegowe dla jednostkowego strumienia masy	$-a_m \delta s \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial r} \Big _{r=R} - a_m \delta \gamma s \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \Big _{r=R} + k_x \frac{X_g}{P_{nas}} \frac{\partial P_{nas}}{\partial T} \Big _{r=R} + T_{sr} + \frac{4T_m}{\pi} \sum_{k=1}^l \frac{\sin \left[ \frac{(2k-1)\omega \tau}{2k-1} \right]}{2k-1}$ $-T(R, \tau) \Big\} - 0,622 k_x \gamma' \frac{P_{nas}}{P} \left\{ u(R, \tau) - u_{r, sr} + \frac{4u_m}{\pi} \sum_{k=1}^l \frac{\sin \left[ \frac{(2k-1)\omega \tau}{2k-1} \right]}{2k-1} \right\} = 0$
	Warunki symetrii	$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \Big _{r=0} = 0 \quad \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial r} \Big _{r=0} = 0$

oscylującej i stałej temperaturze w różnych warunkach. Przykładowo pokazano na rys.3 porównywalne przebiegi suszenia ziarna pszenicy w temperaturze oscylującej i stałej. Celem porównań, jako stałą temperaturę przyjęto średnią arytmetyczną z temperatur systemu oscylującego. W oscylującej temperaturze

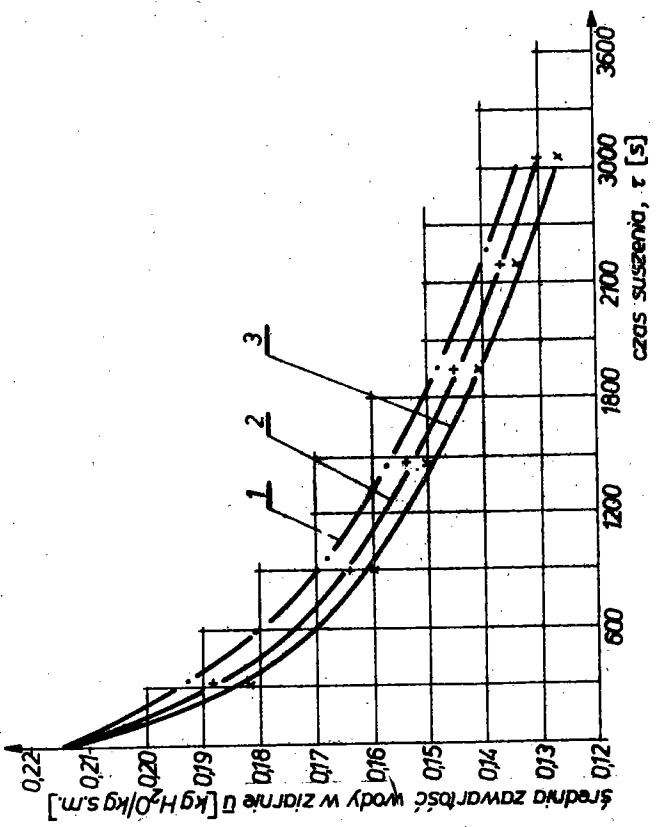


Rys.3. Teoretyczne krzywe suszenia ziarna pszenicy,  $R = 1,74 \cdot 10^{-3}$  m,  $w = 2$  m/s; 1 - w temperaturze stałej  $T_{gr} = 53,2^{\circ}\text{C}$ , 2 - w temperaturze oscylującej  $T_{gr} = 53,2^{\circ}\text{C}$ ,  $T_m = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{og} = 20\text{s}$ ,  $\tau_{ch} = 20\text{s}$ ,  $\omega = 0,1571$  rad/s

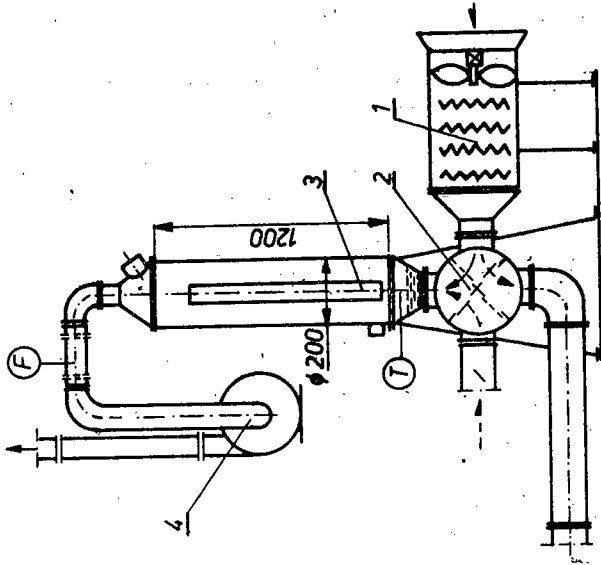
materiał schnie szybciej niż w stałej temperaturze. Powoduje to oszczędność energii od kilku do kilkunastu procent.

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Przeprowadzono doświadczenia suszenia konwekcyjnego w oscylującej i stałej temperaturze pojedynczej kuli oraz fluidyzacyjnego złożów jonitów, ziarna pszenicy i innych. Zastosowany aparat do suszenia fluidyzacyjnego pokazano na rys.4. Próby



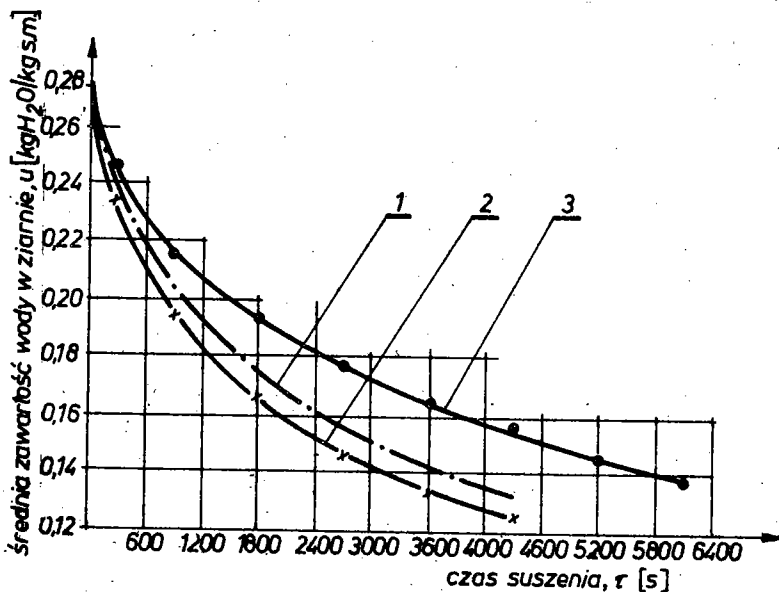
Rys.5. Przebieg suszenia ziarna pszenicy w warstwie flu-  
 idalnej w warunkach  $H = 0,09$  m,  $w = 1,75$  m/s; 1 - pro-  
 ces izotermiczny  $T_E = 54,6^\circ\text{C}$ ; 2 - proces w oscylującej  
 temperaturze  $\tau_{og} = 20\text{s}$ ,  $\tau_{ch} = 20\text{s}$ ,  $\omega = 0,1571$  rad/s,  
 $T_{sr} = 54,2^\circ\text{C}$ ,  $T_M = 16,2^\circ\text{C}$ ; 3 - proces w oscylującej tem-  
 peraturze  $\tau_{og} = 180\text{s}$ ,  $\tau_{ch} = 180\text{s}$ ,  $\omega = 0,01745$  rad/s,  
 $T_{sr} = 54^\circ\text{C}$ ,  $T_M = 16,2^\circ\text{C}$



Rys.4. Schemat stanowiska do bada-  
 nia suszenia fluidyzacyjnego w sta-  
 nej i oscylującej temperaturze ga-  
 zu; 1 - nagrzewnica elektryczna o  
 mocy 6kW, 2 - zawór dwudrogowy, 3 -  
 komora suszarnicza, 4 - wentyla-  
 tor promieniowy, (F) - pomiar natę-  
 żenia przepływu, (T) - pomiar tem-  
 peratury



wykonano przy różnych temperaturach i częstotliwościach ich zmian oraz wartościach parametru  $\nu$ . Parametr  $\nu$  jest stosunkiem czasu przepływu gazu chłodnego do gorącego w jednym okresie zmian temperatury gazu. Stosowane były różne, niezbyt wysokie złoża. Na wykresach (rys. 5,6) pokazano uzyskane wyniki

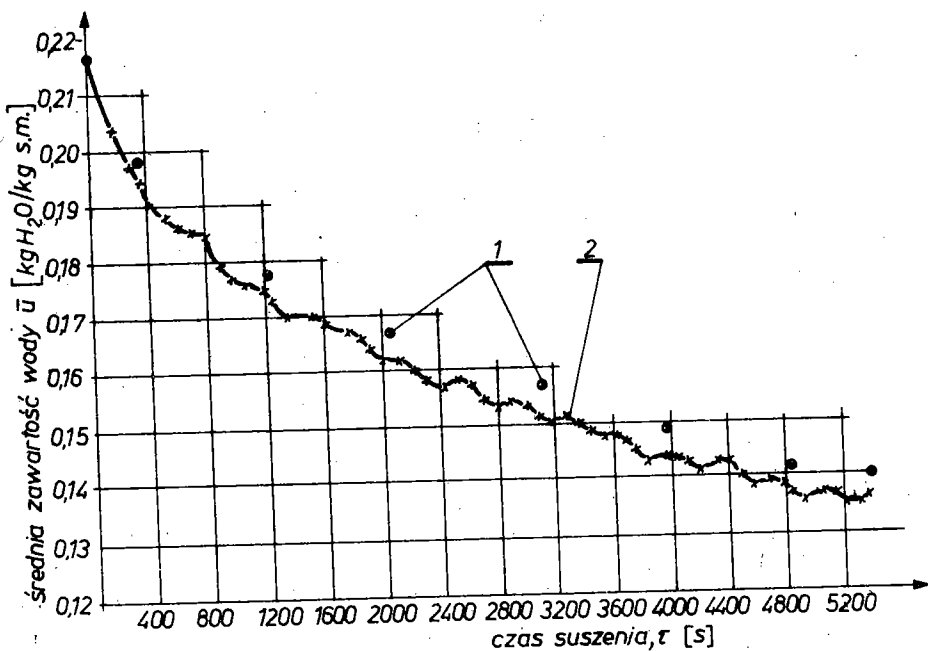


Rys.6. Krzywe suszenia ziarna pszenicy w warunkach fluidalnej w warunkach  $H = 0,08\text{m}$ ,  $w = 1,75\text{ m/s}$ ; 1 - proces izotermiczny  $T_s = 52,4^\circ\text{C}$ ; 2 - proces w oscylującej temperaturze:  $\tau_{og} = 180\text{ s}$ ,  $\nu = 1$ ,  $\omega = 0,01745\text{ rad/s}$ ,  $T_{sr} = 52,5^\circ\text{C}$ ;  $T_m = 18,5^\circ\text{C}$ ; 3 - proces w oscylującej temperaturze:  $\tau_{og} = 60\text{s}$ ,  $\tau_{ch} = 180\text{s}$ ,  $\nu = 3$ ,  $T_{ch} = 31,2^\circ\text{C}$ ,  $T_{og} = 70,1^\circ\text{C}$

doświadczeń. Wynika z nich wniosek podobny do uzyskanego teoretycznie, że suszenie trwa krócej przy zastosowaniu systemu oscylującego. Np. z rys.5 można odczytać czas potrzebny do uzyskania wilgotności końcowej  $0,14\text{ kg H}_2\text{O/kg s.m.}$  Przy oscylacji osiąga się ją w czasie o 8% krótszym przy częstotliwości  $\omega = 0,1571\text{ rad/s}$ , a o 13% krótszym przy częstotliwości  $\omega = 0,01745\text{ rad/s}$ , w porównaniu do czasu uzyskiwanego w stałej temperaturze.

Wykres (rys.6) umożliwia ocenę wpływu parametru  $\psi$  na oszczędność energii. W tym przypadku oprócz odczytu należy wykonać obliczenia pomocnicze, ponieważ różne są czasy przepływu chłodnego i gorącego powietrza. Obliczono, że wraz ze wzrostem  $\psi$  zwiększa się oszczędność energii cieplnej. Zwiększenie  $\psi$  od 1 do 3 powoduje dodatkowe kilkunastoprocentowe oszczędności energii.

Aby ocenić przydatność opracowanego modelu teoretycznego do opisu procesów suszenia fluidyzacyjnego w stałej i oscylującej temperaturze, porównano wyniki eksperymentalne z uzyskanymi na drodze obliczeniowej. Uzyskano dobrą zgodność wyników, gdyż różnice między wartościami eksperymentalnymi średniej zawartości wody a uzyskanymi teoretycznie nie przekraczały 5% (rys.7).



Rys.7. Przebieg suszenia fluidyzacyjnego ziarna pszenicy;  $H = 0,2$  m,  $w = 1,75$  m/s,  $T_{sr} = 43,5^{\circ}\text{C}$ ,  $T_m = 17,2^{\circ}\text{C}$ ; 1 - punkty eksperymentalne, 2 - obliczenia teoretyczne

## 4. WNIOSKI

Opracowany matematyczny model suszenia w II okresie, materiału o kształcie kuli w gazie o oscylującej temperaturze został rozwiązany analitycznie i zweryfikowany eksperymentalnie. Analiza teoretyczna i doświadczalna wykazały korzystne właściwości suszenia fluidyzacyjnego w oscylującej temperaturze w stosunku do porównywalnego procesu w stałej temperaturze. Badania parametrów  $\omega$  i  $\nu$  nasunęły wnioski:

1. Suszenie fluidyzacyjne w gazie o oscylującej temperaturze jest mniej energochłonne od porównywalnego z nim procesu przebiegającego w temperaturze stałej, od kilku do kilkunastu procent. Jest to uzależnione od materiału, częstotliwości zmian temperatury  $\omega$  i wartości parametru  $\nu$ .

2. Oszczędność energii wzrasta wraz ze wzrostem wielkości  $\nu = \tau_{ch}/\tau_{og}$  ( $\nu$  badano w zakresie 1÷3).

3. Zmniejszenie częstotliwości  $\omega$  powoduje dodatkową kilkuprocentową oszczędność energii. W przeprowadzonych doświadczeniach stosowano częstotliwości zmian temperatury gazu w granicach 1/40 ÷ 1/360 Hz.

## BIBLIOGRAFIA

1. Łykov A.W.: Teoria ciepłoprzewodności. Wysszaja Szkoła, Moskwa 1967.
2. Łykov A.W., Michajłow A.: Teoria ciepła i massopierienosa. Gosenergoizdat, Moskwa 1963.
3. Szejman W.A.: Inż.Fiz.Żurnal, t.XXV, nr 4, 607(1973).
4. Szejman W.A.: Inż.Fiz.Żurnal, t.XXXIII, nr 1, 137(1977).

СУШКА В ПСЕВДООЖИЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ ПРИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

## А н н о т а ц и я

В работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки в осциллирующей темпера-

туре газа. Решается аналитически теоретическая модель процесса, которая затем проверяется экспериментальным путем. Исследуется влияние параметров  $\omega$  и  $\nu$ . Показывается, что сушка при осциллирующей температуре требует меньших энергетических затрат по сравнению с изотермическим процессом.

## THE FLUIDIZED BED DRYING AT OSCILLATING GAS TEMPERATURE

### S u m m a r y

The fluidized bed drying of granular materials at oscillating gas temperature have been investigated theoretically and experimentally. The model of the diffusion in the sphere was solved analitically and proved experimentally. The parameters  $\omega$  and  $\nu$  were proven to have essential influence on thermal energy saving. The energy saving of the oscillating system is up to a few per cent.