

## SYMULACYJNY MODEL ZMIAN POŁA TEMPERATURY W SILOSIE ZBOŻOWYM

### Streszczenie

Celem pracy było utworzenie symulacyjnego modelu zmian pola temperatury w nieruchomym złożu ziarna pszenicy, przechowywanej w metalowym, cylindrycznym silosie zbożowym, wyposażonym w stożek wietrzący. Do obliczenia współczynnika wnikania ciepła do ścianek silosu zastosowano sztuczną sieć neuronową. Symulowano zmienne jako funkcje czasu i położenia, rozkłady temperatury przechowywanego ziarna pszenicy w czasie siedmiu miesięcy. Względny, globalny błąd aproksymacji temperatury ziarna przy ścianie silosu i w osi silosu w całym okresie jego przechowywania nie przekraczał odpowiednio 11% i 4%. Różnice między zmierzoną i obliczoną wartością temperatury ziarna w całym okresie przechowywania nie przekraczały 3°C.

**Słowa kluczowe:** Silos, ziarno, przechowywanie, symulacja

### Oznaczenia

$\rho$  - gęstość ziarna, kg/m<sup>3</sup>  
 $\lambda$  - przewodność cieplna ziarna, W/m K  
 $C_p$  - ciepło właściwe ziarna, J/kg  
 $er$  - globalny błąd aproksymacji temperatury, %  
 $h_T$  - współczynnik wnikania ciepła, W/m<sup>2</sup> K  
 $q$  - ciepło wypromieniowane, W/m<sup>2</sup>  
 $r, z$  - współrzędne w cylindrycznym układzie współrzędnych, m  
 $t$  - czas, s  
 $T, T_0, T_{ot}$  – temperatura odpowiednio: w chwili  $t$ , początkowa, otoczenia, °C  
 $S, E$  – indeksy oznaczające oś symetrii ( $S$ ) i zewnętrzną powierzchnię ( $E$ )  
 $n$  - kierunek normalny do zewnętrznej powierzchni silosu

### Wprowadzenie

W latach 2000÷2002 wyprodukowano w Polsce łącznie 21954 Mt ziarna zbóż [Anonymous 2003]. W okresie składowania, w zależności od warunków panujących w złożu, może dojść do pogorszenia lub wręcz do utraty pożądanej jakości ziarna. Przechowywane ziarno zbóż może ulec uszkodzeniu głównie w wyniku ataku roztoczy, owadów oraz zagrzybienia.

Utrzymanie niskiej temperatury wewnątrz silosu uchroni ziarno przed rozwojem owadów, podczas gdy utrzymanie niskiej wilgotności ziarna (a tym samym niskiej aktywności wody) stanowi ochronę przed rozwojem mikroorganizmów i grzybów [Fleurat-Lessard 2002]. Inne ważne parametry wpływające na jakość ziarna, to skład chemiczny gazu w przestrzeniach międzyziarnowych oraz długość okresu składowania ziarna. Zbyt wysoka temperatura i wilgotność ziarna sprzyjają rozwojowi drobnoustrojów, a zatem sprzyjają także intensyfikacji procesów oddychania ziarna.

Jedną z metod pozyskania informacji o zmianach pól temperatury w złożach ziarna jest wyznaczenie numerycznego rozwiązania równania przewodnictwa ciepła w nieruchomym złożu metodą elementów skończonych lub metodą różnic skończonych. Większość badaczy wykorzystuje w symulacjach komputerowych wartości parametrów powietrza otoczenia oraz promieniowania słonecznego zmierzone przez stacje meteorologiczne, zwykle w odstępach godzinnych [Alagusundaram i in. 1990; Jia i in. 2000]. Dyskretny charakter tych danych sprawia, iż dla dowolnej chwili czasu warunki atmosferyczne muszą być aproksymowane według posiadanych wyników pomiarów. Alternatywą jest opracowanie zamkniętego modelu zmian parametrów powietrza w otoczeniu silosu w oparciu o posiadane informacje i zastosowanie ich w eksperymentach symulacyjnych.

Ze względu na bardzo dużą liczbę danych, na podstawie których należałoby takie modele utworzyć, a także ze względu na dużą zmienność danych w obrębie populacji wydaje się, iż techniki tworzenia sztucznych sieci neuronowych mogą stanowić narzędzie odpowiednie do tworzenia modeli czasowych zmian parametrów powietrza w otoczeniu silosu. Sztuczne sieci neuronowe coraz częściej są wykorzystywane do symulacyjnych badań procesów transportu ciepła i masy w czasie termicznej obróbki surowców i produktów spożywczych [Sablani, Rahman 2003; Ciesielski, Zbicinski 2002; Farkas i in. 2000; Mittal, Zhang 2000].

Celem pracy było utworzenie symulacyjnego modelu zmian pola temperatury w nieruchomym złożu ziarna pszenicy przechowywanej w metalowym, cylindrycznym silosie zbożowym, wyposażonym w stożek wietrzący. Do obliczania współczynnika wnikania ciepła do ścianek silosu wykorzystano sztuczną sieć neuronową.

## **Metodyka**

Do badań wykorzystano ziarno pszenicy odmiany *Roma*, wyprodukowane, wysuszone i zmagazynowane w Zakładzie Produkcyjno-Doświadczalnym BAŁCYNy zlokalizowanym w Bałcynach koło Olsztyna. Metalowy silos należący do Zakładu Produkcyjno-Doświadczalnego BAŁCYNy został

napełniony ziarnem pszenicy o wilgotności 12,2%. Ziarno było przechowywane w silosie w okresie od 19 października 2000 do 8 maja 2001. Silos wykorzystany w badaniach miał kształt cylindra o zewnętrznej średnicy 3 m, zakończonego lejem spustowym o kącie 103°. Silos był wykonany z blachy stalowej o grubości 1 mm. Całkowita wysokość silosu wynosiła 7800 mm, natomiast wysokość części cylindrycznej 5000 mm. Silos był wyposażony w stożek wietrzący o objętości 2,2 m<sup>3</sup> i średnicy podstawy stożka 1,63 m, przy czym podstawa stożka wietrzącego leżała 300 mm powyżej dolnej podstawy cylindrycznej części silosu. Wysokość warstwy zasypanego zboża, mierzona od dolnej podstawy cylindrycznej części silosu, wynosiła 4500 mm. Zasilanie stożka wietrzącego powietrzem umożliwiały wentylator wraz z układem przewodów, jednak w całym okresie trwania eksperymentu wentylator był wyłączony.

W czasie przechowywania ziarna wykonano serię pomiarów temperatury powietrza w otoczeniu silosu oraz temperatury ziarna pszenicy w trzech punktach. Wszystkie trzy punkty pomiarowe leżały na wysokości 2,4 m, licząc od dolnej podstawy cylindrycznej części silosu i były zlokalizowane odpowiednio: 1) w osi symetrii silosu, 2) w połowie długości promienia poprzecznego przekroju silosu oraz 3) w odległości 6 cm od wewnętrznej ścianki silosu.

Dla potrzeb eksperymentów symulacyjnych mieszaninę ziarna i powietrza w silosie potraktowano jako jednorodny ośrodek ciągły o parametrach termodynamicznych zależnych od położenia  $(r, z)$  punktu w silosie i od czasu  $t$ . Równanie (1) opisujące zmianę temperatury ziarna w silosie oraz warunek początkowy (2) i warunki brzegowe (3) miały, przy uwzględnieniu osiowej symetrii, następującą postać:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$T(r, z, t = 0) = T_0(r, z) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_s = 0, & t > 0 \\ \left. -k \frac{\partial T}{\partial n} \right|_E = h_T [T_E - T_{ot}(t)] - q, & t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Analizowano zmiany temperatury ziarna w silosie w okresie siedmiu miesięcy. W eksperymentach symulacyjnych przyjęto za Pabisem [1982] następujące wartości współczynników w równaniu (1):  $\rho=762 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p=1754 \text{ J/kg K}$ ,  $\lambda=0,1561 \text{ W/mK}$ . Na podstawie wyników Alagusundaram i in. [1990] przyjęto  $h_T=3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Eksperymenty symulacyjne realizowano

w środowisku *Femlab* 2.3 (Comsol Co.), działającym jako nakładka na *Matlab* 6.5 (MathWorks, Inc.). Przebieg zmian temperatury otoczenia w okresie siedmiu miesięcy opisano modelem neuronowym.

Neuronowy model temperatury otoczenia zbudowano w środowisku *Statistica Neural Networks PL* (Statsoft, Inc.) , przy czym zastosowano sztuczną sieć neuronową typu RBF (*Radial Basis Functions*) o strukturze 1-891-1 (1 neuron w warstwie wejściowej, 891 neuronów w warstwie ukrytej i 1 neuron w warstwie wyjściowej). Uzyskano następujące parametry procesu uczenia sieci: indeks jakości uczenia równy 0,117, indeks jakości walidacji równy 0,204 oraz indeks jakości testowania równy 0,205. Neuronowy model temperatury otoczenia został przed zaimplementowaniem w środowisku *Matlab* wyeksportowany z poziomu *Statistica Neural Networks* w kodzie źródłowym w języka C, następnie skompilowany jako biblioteka DLL i dopiero w takiej formie wykorzystany z poziomu środowiska *Matlab*.

Względny, globalny błąd aproksymacji temperatury ziarna obliczano na podstawie wzoru (4):

$$er(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [T_{\text{pomiar}}(t_i) - T_{\text{symulacja}}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [T_{\text{pomiar}}(t_i)]^2}} \cdot 100\% \quad (4)$$

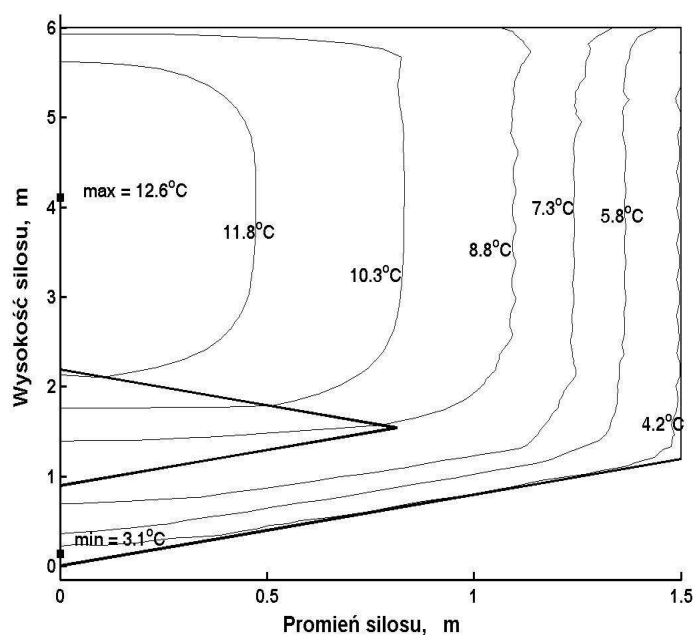
## Wyniki badań i dyskusja

Symulowano zmienne w funkcji czas i położenia rozkładu temperatury ziarna pszenicy przechowywanego w metalowym silosie zbożowym w okresie od 19 października 2000 do 8 maja 2001. Silos wykorzystany do badań w warunkach rzeczywistych był osłonięty przed działaniem bezpośredniego i odbitego promieniowania słonecznego przez ukształtowanie terenu (wysokie budynki i drzewa położone od południowo-zachodniej strony silosu). Początkowa średnia temperatura ziarna wynosiła 15,1°C. Ze względu na to, że w całym okresie realizacji pomiarów temperatura powietrza w otoczeniu silosu nie przekraczała 20°C, w badaniach symulacyjnych pominięto wewnętrzne źródła ciepła.

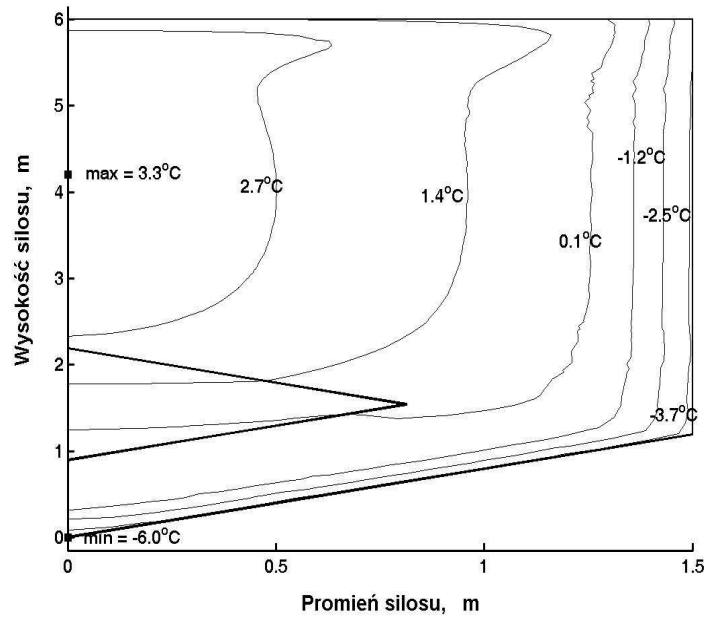
Względny, globalny błąd aproksymacji temperatury ziarna przy ścianie silosu i w osi silosu w całym okresie jego przechowywania nie przekraczał

odpowiednio 11% i 4%. Różnica między zmierzoną i obliczoną wartością temperatury ziarna w całym okresie przechowywania nie przekraczała 3°C. Na rysunkach 1, 2 i 3 przedstawiono przestrzenne rozkłady temperatury ziarna pszenicy w silosie, wyznaczone dla 40, 105 i 165 dnia przechowywania ziarna. W 40. dniu przechowywania temperatura powietrza w otoczeniu silosu nie spadła jeszcze poniżej 0°C. 105. dzień przechowywania był jednym z najchłodniejszych, a temperatura powietrza spadła poniżej minus 10°C. W 165. dniu przechowywania temperatura powietrza wzrosła do poziomu powyżej plus 10°C.

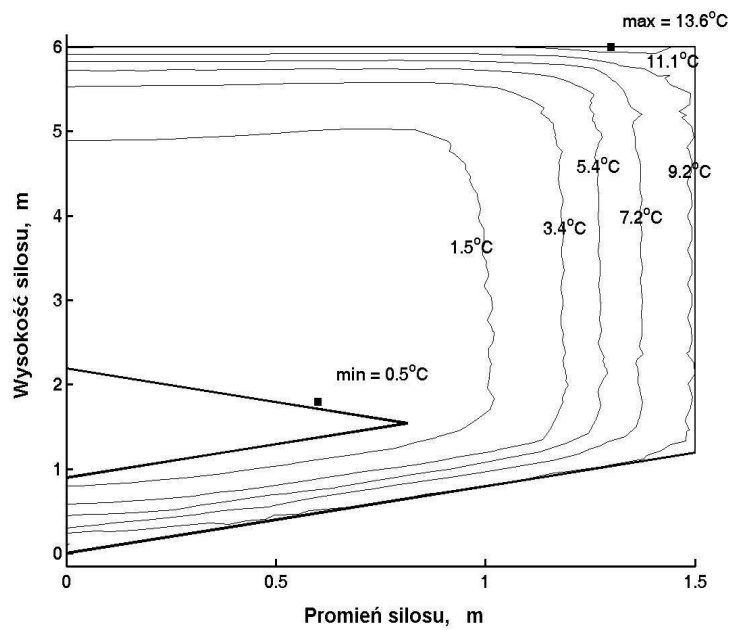
Na podstawie wyznaczonych przebiegów zmian rozkładów temperatury w złożu przechowywanego ziarna pszenicy stwierdzono, że zgodnie z oczekiwaniem, temperatura ziarna leżącego blisko ścianki silosu była dużo bardziej wrażliwa na zmiany temperatury otoczenia, niż temperatura ziarna leżącego w pobliżu osi silosu. Stwierdzono też, że ziarno leżące blisko osi silosu reaguje na zmiany temperatury powietrza otoczenia ze znacznym opóźnieniem. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy wysnuli wniosek, iż krótkotrwałe spadki temperatury poniżej zera, powodujące przemrożenie pewnych partii ziarna w silosie, nie muszą skutkować obniżeniem jakości ziarna.



Rys. 1. Rozkłady temperatury ziarna po 40 dniach przechowywania  
Fig. 1. Temperature distribution in grain after 40 days of storage



Rys. 2. Rozkłady temperatury ziarna po 105 dniach przechowywania  
 Fig. 2. Temperature distribution in grain after 105 days of storage



Rys. 3. Rozkłady temperatury ziarna po 165 dniach przechowywania  
 Fig. 3. Temperature distribution in grain after 165 days of storage

Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność zastosowanego modelu do aproksymacji temperatury ziarna w czasie jego przechowywania w metalowym silosie zbożowym

## **Wnioski**

Uznano, iż analizowany model pola temperatury ziarna w silosie, wykorzystujący do opisu zmian temperatury otoczenia jednowarstwową sztuczną sieć neuronową, został zweryfikowany pozytywnie. Niekorzystne dla jakości ziarna skutki długich okresów z ujemną temperaturą powietrza w ciągu sezonu przechowalniczego można skutecznie zminimalizować przez zastosowanie takich środków technicznych, powodujących zmniejszenie współczynnika wnikania ciepła na zewnętrznej powierzchni silosu, jak zastosowanie odpowiednich powłok malarskich lub termicznej izolacji ścianki silosu przy użyciu wełny mineralnej lub styropianu. Opracowany model pozwala konstruktorowi już w fazie projektowania izolacji podejmować decyzje na podstawie informacji o przewidywanym rozkładzie temperatur, czyli może mieć pośredni wpływ na kształtowanie jakości przechowywanego ziarna.

## **Bibliografia**

*Alagusundaram K., Jayas D.S., G.White N.D., Muir W.E. 1990. Three-dimensional, finite element, heat transfer model of temperature distribution in grain storage bins. Transaction of The ASAE, 33(2): 577-584*

*Anonymous. 2003. Mały rocznik statystyczny. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa*

*Ciesielski K., Zbicinski, I. 2003.: Application of classical and hybrid neural models to simulation of fluidised bed drying. Chemical and Process Engineering, 23(1): 49-66*

*Farkas I., Remenyi P. Biro A., 2000. A neural network topology for modelling grain drying. Computers and Electronics in Agriculture, 26: 147-158*

*Fleurat-Lessard F. 2002. Qualitative reasoning and integrated management of the quality of stored grain: a promising new approach. Journal of Stored Products Research, 38: 191-218*

*Jia C., Sun D.W., Cao C. 2000. Finite Element Prediction of Transient Temperature Distribution in a Grain Storage Bin. Journal of Agricultural Engineering Research, 76: 323-330*

Mittal G.S., Zhang J. 2000. Prediction of temperature and moisture content of frankfurters during thermal processing using neural network. *Meat Science*, 55: 13-24

Pabis S. 1982. *Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych*. PWRiL, Warszawa

Sablani S.S., Rahman M.S. 2003. Using neural networks to predict thermal conductivity of food as a function of moisture content, temperature and apparent porosity. *Food Research International*, 36: 617–623

## **SIMULATION MODEL OF THE CHANGES IN TEMPERATURE FIELDS IN A GRAIN SILO**

### **Summary**

The study aimed at developing a simulation model of changes in temperature field in stationary bed of wheat grain stored in a cylindrical metal silo, equipped with ventilation cone. Artificial neural network was used to compute the coefficient of heat penetration into walls of the silo. Time and location dependent courses of temperature distribution in the wheat grain were simulated for the storage period of seven months. The relative total error of grain temperature approximation near the silo wall and in silo axis during whole storage period did not exceed 11% and 4%, respectively. The differences between measured and simulated grain temperatures along the whole storage period were less than 3° C.

**Key words:** Silo, grain, storage, model, simulation

*Recenzent – Jerzy Weres*