

## **TRANSPORT WILGOCI PRZY PRZECHOWYWANIU ZIARNA W SILOSACH. CZEŚĆ I. MODEL MATEMATYCZNY TRANSPORTU WILGOCI W ZŁOŻU**

Marian Szarycz, Ryszard Kramkowski, Eugeniusz Kamiński,  
Klaudiusz Jałoszyński

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę transportu wilgoci zachodzącego w złożu zboża magazynowanego w silosach i modele tego transportu w złożu w różnych strefach silosu. Wyróżniono strefy różniące się mechanizmami transportu wilgoci. Stwierdzono, że kluczowym parametrem decydującym o nawilżaniu i wysychaniu zboża w silosie jest rozkład dobowy temperatury otoczenia. Zaproponowano numeryczny opis zmian tej temperatury w cyklach dobowym i rocznym.

**Słowa kluczowe:** silos zbożowy, transport wilgoci, składowe transportu

### **OZNACZENIA**

t – temperatura, °C  
U<sub>red</sub> – zredukowana zawartość wody, -  
u – zawartość wody w suchej masie, kg·kg<sup>-1</sup>  
u<sub>k</sub> – krytyczna zawartość wody, kg·kg<sup>-1</sup>  
u<sub>r</sub> – równowagowa zawartość wody, kg·kg<sup>-1</sup>  
w – wilgotność materiału, %  
w<sub>r</sub> – wilgotność równowagowa materiału, %  
φ – wilgotność powietrza, %  
φ<sub>r</sub> – wilgotność równowagowa powietrza, %  
τ – czas, h

### **WSTĘP**

Jednym z istotnych problemów przechowywania ziarna zbóż jest nierównomierny rozkład wilgoci w złożu. W ustabilizowanych warunkach termicznych następowałoby wyrównywanie wilgotności poszczególnych elementów złoża, jednakże zmienne warunki otoczenia powodują, że uwilgotnienie cząstek w silosie jest zróżnicowane.

W związku z różnicami wilgotności między poszczególnymi ziarniakami, nawet przy założeniu stałej temperatury, w silosie występuje nieustanny ruch wilgoci [Hamadek i Kamiński 2000].

Większość badań transportu wilgoci w złożu ziarna dotyczyła możliwości wykorzystania przesuszonego materiału jako naturalnego sorbentu [Ledwoń i Chmiel 1989, Ledwoń i in. 1998, Słodczyk 1998, Kusińska 1998, Suszanowicz 1999]. Zastosowanie takiego sorbentu pozwoliło na obniżenie wilgotności partii ziarna zawilgoconego, co ma szczególne znaczenie w okresach, gdy podczas żniw panują niekorzystne warunki atmosferyczne. W takich okresach przesuszone ziarno może przedłużyć okres kampanii suszarniczej bez ryzyka zniszczenia zbiorów. Prowadzone badania zmierzały do ustalenia właściwych proporcji sorbentu i sorbatu w zależności od ich parametrów początkowych. Praktyczne wykorzystanie przesuszonego ziarna jako naturalnego sorbatu nie wyjaśnia jednak podstawowych zjawisk transportu wilgoci zachodzących w złożu.

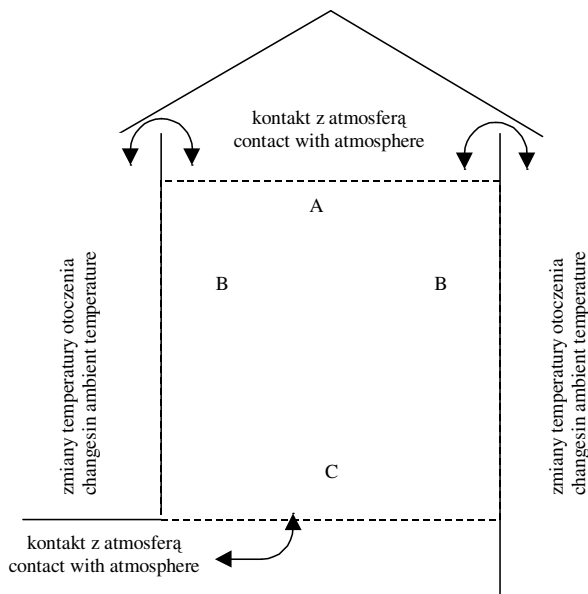
W modelowaniu procesów suszarniczych zakłada się najczęściej jednorodność materiału wyjściowego. Jednakże materiał ten w rzeczywistości jest zawsze przechowywany również przed suszeniem, choćby nawet przez krótki okres. W najlepszym przypadku może być to okres przewozu ziarna po zbiorze kombajnowym do suszarni. W tym czasie wilgotność w materiale wyjściowym zmienia się, a w związku z tym w modelowaniu konieczne są założenia upraszczające i weryfikacja doświadczalna sformułowanego modelu.

W przechowalnictwie zbóż stosowane są różnego rodzaju magazyny ziarna. Jednym z takich magazynów jest silos wolno stojący otwarty, z sitową podłogą umożliwiającą okresowe przewietrzanie złoża. Ściany takiego silosu są wykonane często z blachy, bez izolacji cieplnej. Doniesienia literaturowe obfitują w informacje związane z przechowalnictwem zbóż w silosach. Jednakże większość bazuje na analizie rozkładu sił i ciśnień w trakcie zasypu [Klimek i Kobiela 1999], przechowywania [Hamadek i Kamiński 2000, Łapko i Prusiel 2000] oraz opróżniania silosów. Z punktu widzenia przechowalnictwa zbóż najistotniejsza jest analiza ruchu ciepła i masy, która pozwala ocenić kompleksowo zagadnienie wpływu warunków termicznych na jakość przechowywanych zbóż. W praktyce przechowalniczej w złożu składowanego ziarna zachodzi szereg niekorzystnych zmian. Zmiany te, choć mają zasięg lokalny, mogą rozszerzać się na całe złoże. Wskazanie zjawisk podstawowych zachodzących w złożu oraz określenie stref ich występowania, jak również określenie dynamiki tych zjawisk, ma szczególne znaczenie praktyczne. Wskazując ich źródło, można ograniczyć straty przez nie powodowane. W pracy przeprowadzono analizę tych zjawisk na podstawie modelowego silosu dla zmiennych warunków termicznych.

Celem pracy była teoretyczna analiza transportu wilgoci między ziarniakami podczas przechowywania zboża w silosach, pozwalająca na sformułowanie podstaw modelu matematycznego rozpatrywanego zjawiska oraz sformułowanie ilościowego opisu przebiegu temperatury dobowej w różnych okresach roku, co pozwala na przewidywanie przebiegu zjawisk transportu wilgoci w zbożu przechowywanym w silosach.

## METODYKA I WYNIKI

**Transport wilgoci zachodzący podczas przechowywania zbóż.** W modelowym silosie (rys. 1) wydzielono strefy, w których charakter zachodzących zjawisk i ich skutki mają różne uwarunkowania.

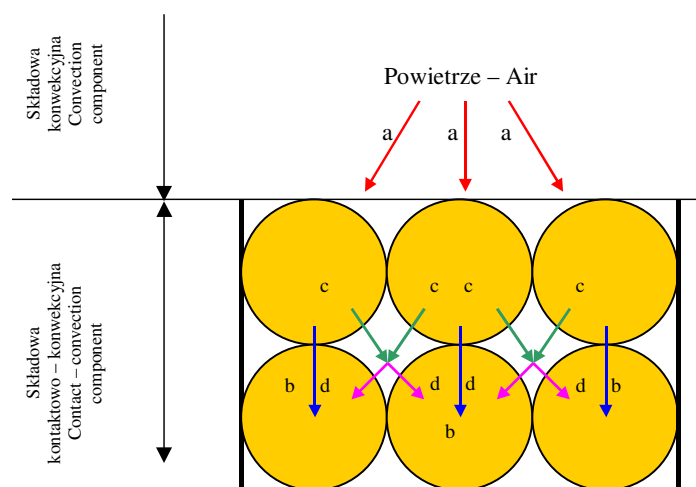


Rys 1. Silos modelowy: A, B, C – strefy występowania rozpatrywanych zjawisk transportu wilgoci

Fig. 1. Model of silo: A, B, C – the zones of occurrence of considered moisture transport phenomena

W **strefie A** – powierzchnia złoża kontaktuje się bezpośrednio z atmosferą. W warunkach rzeczywistych stan równowagi termodynamicznej między powietrzem zawierającym parę wodną a materiałem wilgotnym występuje sporadycznie, a stąd mamy do czynienia z nieustannym transportem wilgoci pomiędzy powietrzem a materiałem. Transport ten między powietrzem a warstwą ziaren na powierzchni odbywa się wyłącznie na drodze konwekcyjnej. Zmieniająca się wilgotność tej warstwy działa na materiał położony głębiej. Oddziaływanie to odbywa się poprzez wzajemny kontakt ziaren oraz poprzez konwekcję za pośrednictwem powietrza z przestrzeni międzyziarnowych. W konsekwencji każda następną warstwę złoża (pojedyncza warstwa ziarna) przejmuje wilgoć od powietrza z przestrzeni międzyziarnowych lub oddaje do niego wilgoć. Transport wilgoci między warstwami ziaren odbywa się również na drodze kontaktowej. Teoretycznie powierzchnia kontaktu jest zerowa (wzajemny kontakt jest punktowy). W praktyce powierzchnia ta ma określoną, niezerową wartość, a przez to możliwy

jest przepływ wody również poprzez kontakt elementów złoża. Schemat ideowy transportu wody w strefie A przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat transportu wilgoci w przechowywanym zbożu w strefie A: a – konwekcyjne wnikanie wilgoci z powietrza otoczenia, b – kontaktowy transport wilgoci, c – wnikanie konwekcyjne wilgoci od ziarna do powietrza z przestrzeni międzyziarnowej, d – wnikanie konwekcyjne wilgoci od powietrza z przestrzeni międzyziarnowej do ziarna

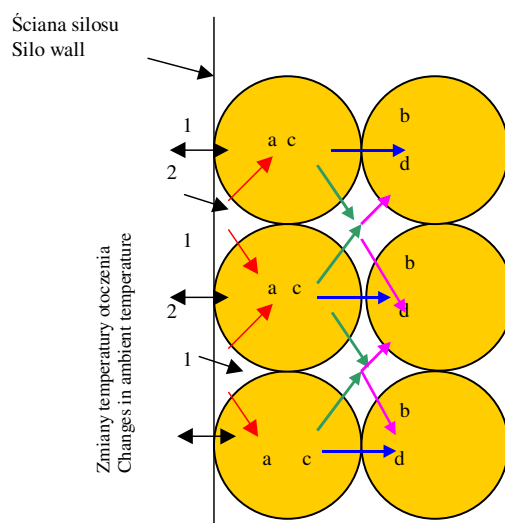
Fig. 2. The scheme of moisture transport in stored wheat in A-zone: a – convection moisture penetration from the surrounding air, b – contact moisture transport, c – convection moisture penetration of wheat to the air in inter-granular space, d – convection moisture penetration from the air from inter-granular space to the wheat

Z analizy wynika, że na powierzchni transport wilgoci z otoczenia odbywa się wyłącznie na drodze konwekcyjnej, a w złożu (pomiędzy warstwami ziarna), na drodze kontaktowo-konwekcyjnej. Oddzielny opis poszczególnych składowych pozwala na przewidywanie skutków przechowywania ziarna w zmiennych warunkach otoczenia. Składowa konwekcyjna zależy od różnicy między aktualną wilgotnością względną powietrza a jego wilgotnością równowagową dla danej wilgotności ziarna. Składowa kontaktowa zależy od różnicy wilgotności między stykającymi się ziarnami.

W **strefie B** zmienna temperatura otoczenia powoduje zmiany temperatury ścian silosu, a w konsekwencji zmienne warunki termiczne w kolejnych, pionowych warstwach złoża. Zmiany te wymuszają ruch masy pomiędzy kolejnymi warstwami ziaren odbywający się na drodze kontaktowo-konwekcyjnej. Schemat transportu wilgoci w tej strefie przedstawia rysunek 3.

Kontaktowy transport ciepła obniża lub podwyższa temperaturę warstwy przyściennej ziaren. Wnikanie ciepła do przyściennej warstwy powietrza zmienia w niej warunki termiczno-wilgotnościowe. Co prawda, obniżenie temperatury powietrza podwyższa równowagową zawartość wody w ziarnie, lecz wahania temperatury zewnętrznej mogą

powodować okresowe wykraplanie się wody z powietrza (obniżenie temperatury powietrza poniżej punktu rosy) i wtórne nawilżanie materiału. Odwrotnie, gdy temperatura materiału i powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych wzrośnie, następuje przejście wilgoci od materiału do tych przestrzeni. Z przemienności tego zjawiska nie wynikałyby niekorzystne zmiany w warstwie, gdyby nie fakt, że proces wtórnego nawilżania złoży jest znacznie szybszy od procesu suszenia. Wtórne nawilżanie złoży w warstwie przyściennej powoduje (na skutek różnych zjawisk, zależnych z kolei od warunków otoczenia) przyklejanie się cząstek złoży do ścian silosu. Stąd dla bezpieczeństwa obsługi, okresowe czyszczenie silosu powinno odbywać się jak najczęściej.



Rys. 3. Schemat transportu wilgoci w przechowywanym zbożu w strefie B: a – konwekcyjne wnikanie wilgoci z przyściennej warstwy powietrza do ziaren; b – kontaktowy transport wilgoci; c – wnikanie konwekcyjne wilgoci od ziarna do powietrza z przestrzeni międzyziarnowej; d – wnikanie konwekcyjne wilgoci od powietrza z przestrzeni międzyziarnowej do ziaren; 1 – kontaktowy ruch ciepła między ścianą silosu a przyścienną warstwą ziaren; 2 – wnikanie ciepła do przyściennej warstwy powietrza

Fig. 3. Scheme of moisture transport in the wheat stored in B-zone: a – convection moisture penetration from air film to grain, b – contact moisture transport, c – convection penetration of moisture from the grain to the air from inter-granular space, d – convection moisture penetration to the air from inter-granular space to the grains, 1 – contact heat transport between the silo and adjacent grain film, 2 – heat penetration from the film to air

Pozostałe zjawiska zachodzące w tej strefie są podobne jak w strefie A, z tym, że siły napędowe transportu konwekcyjnego i kontaktowego mogą być znaczne na skutek szybkiej reakcji ścian silosu i złoży na warunki zewnętrzne.

Strefa A jest układem otwartym bez znaczących sił działających na cząstki złoży. W strefie B natomiast, w zależności od jej położenia w warstwie, działają ciśnienia, a w związku z tym i siły, związane z wysokością złoży. Rozkład ciśnień w silosie

w zależności od jego wymiarów był przedmiotem szeregu analiz teoretycznych i doświadczeń empirycznych [Hamadek i Kamiński 2000]. Z badań tych wynika, że ciśnienia te są zmienne i nie zależą liniowo od wysokości warstwy. Ich zmienność wynika również ze zjawisk przedstawionych uprzednio (wtórne nawilżanie w warstwach przy ścianach silosu, a z w związku z tym zmiany warunków tarcia: statycznego, dynamicznego oraz tarcia wewnętrznego występujące na skutek zmian wilgotności materiału i jego właściwości reologicznych). Z rozkładu ciśnienia wynika również zmiana powierzchni kontaktu ziaren sąsiednich, zależna od położenia w złożu oraz od ich właściwości reologicznych.

**Strefa C** w przedstawionym modelowym silosie zachowuje się tak, jak strefa A, z tym, że w strefie tej dochodzi jeszcze zmienny rozkład ciśnienia, a z tym związana jest zmiana powierzchni kontaktu ziaren, jak to ma miejsce w strefie B, oraz zmiana porowatości złoża. Zróżnicowanie rozkładu ciśnienia dotyczy całego przekroju poprzecznego.

Kluczowe i niezbędne dla przewidywania skutków przechowywania są zatem dane dotyczące udziałów składowych konwekcyjnej i kontaktowej transportu wilgoci. Dla wyznaczenia tych udziałów opracowano metodykę bezpośredniego wyznaczania składowej konwekcyjnej. Bezpośredni pomiar składowej kontaktowej jest trudny, dlatego opracowano metodykę wyznaczania intensywności transportu konwekcyjno-kontaktowego jako zjawiska skojarzonego.

**Dodatkowe uwarunkowania modelu matematycznego.** Kluczowym parametrem mającym wpływ na zjawiska zachodzące w silosach jest przebieg zmian temperatury otoczenia w zależności od pory roku. Dane meteorologiczne ujmują ten przebieg w sposób tabelaryczny bądź wykresowy. Taki sposób przedstawiania dobowego rozkładu temperatury nie pozwala na modelowanie matematyczne zjawisk termodynamicznych. Dlatego też zachodzi konieczność liczbowego ujęcia tych zmian.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że warunki zewnętrzne mają wpływ na podstawowe zjawiska zachodzące w złożu. Powierzchnia kontaktu złoża z powietrzem atmosferycznym może być ograniczona poprzez dobranie odpowiednich wymiarów silosu. W ten sam sposób może być dobrana powierzchnia ścian bocznych. Ruch ciepła poprzez te ściany może być ograniczony odpowiednią izolacją cieplną. Niemniej jednak przedstawione zjawiska będą zachodzić zawsze, a wymienione działania mogą najwyżej ograniczyć ich skalę, co z kolei może zintensyfikować niektóre z nich, wymienione w analizie.

W warunkach normalnych (pomijając okresy szczególnie wilgotne i szczególnie suche) wilgotność względna powietrza otoczenia waha się w granicach 60–70%. Z wewnętrznych warunków największe znaczenie wydaje się mieć panująca aktualnie temperatura. Jednakże temperatura jest zależna od pory roku, a w związku z tym od natężenia promieniowania słonecznego. Wieloletnie obserwacje meteorologiczne wahań temperatury w ciągu dnia wykazują, że te wahania nie spełniają właściwości rozkładu normalnego. Stąd najczęściej rozkład temperatury przedstawia się w formie tabel lub wykresów, ważnych dla kolejnych dni roku. Jednak dane te pozwalają stwierdzić, że rozkład temperatury każdego dnia jest zależny od wartości temperatury maksymalnej w ciągu dnia, oraz minimalnej temperatury w nocy. Ponadto rozkład ten jest niesymetryczny ze względu na czas (przedpołudnie-popołudnie oraz wieczór-rano) oraz ze

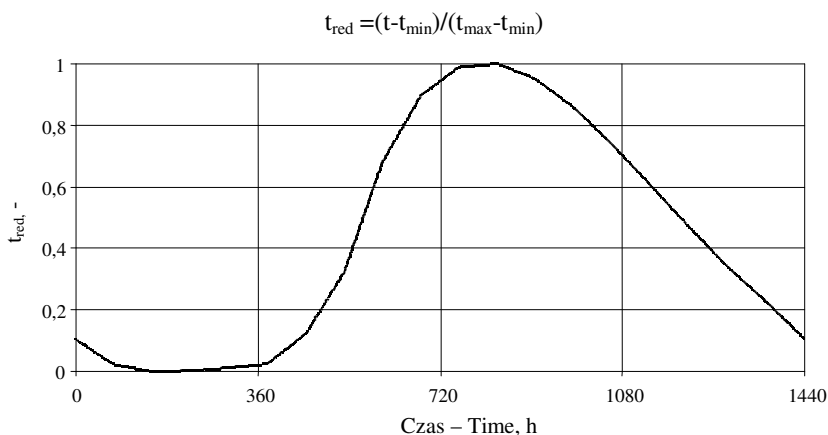
względem na temperaturę średnią. Z właściwości rozkładu temperatury wynika trudność opisu jej zmienności, który to opis jest konieczny w obliczeniach termodynamicznych, symulujących warunki naturalne.

Z analizy wieloletnich danych meteorologicznych i właściwości funkcji matematycznych wynika, że do opisu przebiegu modelowych zmian temperatury może posłużyć jedna z postaci równania Legendre'a. Każda z postaci tego równania jest niesymetryczna podwójnie: względem osi poziomej oraz względem dowolnej osi pionowej. Podobnie zachowuje się rozkład temperatur w ciągu doby. Stosowanie bezpośrednio równań Legendre'a nie jest możliwe ze względu na ich zero-jedynkowy zakres. Ponadto opis przebiegu temperatur w ciągu doby wymaga wielokrotnego odwracania tych równań oraz ich fragmentarycznej superpozycji. Dodatkową trudność opisu sprawia dostosowanie argumentu do doby mającej 24 godziny oraz wartości funkcji do wahań temperatur: minimalnej i maksymalnej w ciągu dnia, które są zmienne w ciągu roku. Dlatego dla obliczeń termodynamicznych proponuje się postać dyskretną rozkładu temperatury przy podstawowym przyroście argumentu wynoszącym 1 minutę. Zmienne warunki temperatury maksymalnej i minimalnej, w ogólnym opisie zmienności wymagają zredukowanej postaci temperatury. Temperaturę tę definiuje się jako:

$$t_{red} = \frac{t_{\tau} - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} \quad (1)$$

gdzie:  $t_{\tau}$  – temperatura aktualna,  
 $t_{min}$  – temperatura minimalna w ciągu doby,  
 $t_{max}$  – temperatura maksymalna w ciągu doby.

Przebieg takiego rozkładu, dostosowany do doby mającej 24 godziny, z interwałem czasowym 1 minuty przedstawiono na rysunku 4.

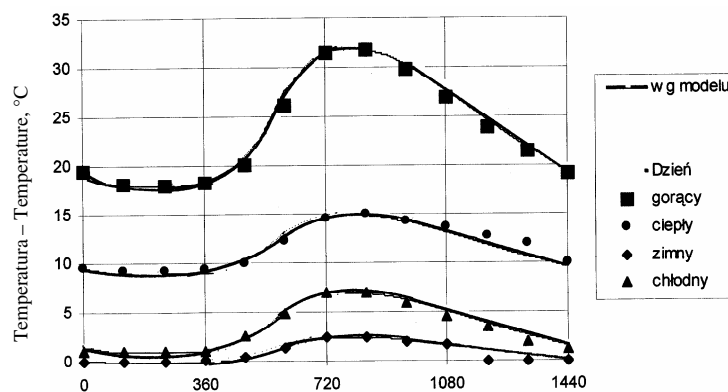


Rys. 4. Rozkład zredukowanej temperatury powietrza w ciągu doby. Interwał czasowy – 1 minuta  
 Fig. 4. Distribution of relative air temperature in 24-hour period. Interval of time – 1 minute

Na podstawie dyskretnej postaci rozkładu temperatury dobowej przy przyroście czasu wynoszącym 1 minutę z wykorzystaniem równania Legendre'a obliczono przebieg zredukowanej temperatury dobowej dla typowych wartości dobowych temperatur maksymalnych i minimalnych. Przyjęto następujące określenia:

- doba gorąca –  $t_{\max} = 32^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\min} = 18^{\circ}\text{C}$ ;
- doba ciepła –  $t_{\max} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\min} = 9^{\circ}\text{C}$ ;
- doba chłodna –  $t_{\max} = 7^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\min} = 1^{\circ}\text{C}$ ;
- doba zimna –  $t_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\min} = 0^{\circ}\text{C}$ ;

Na rysunku 5 przedstawiono krzywe dobowego rozkładu temperatury obliczone na podstawie modelu matematycznego z uwzględnieniem dyskretnej postaci jej rozkładu za pomocą funkcji Legendre'a na tle wartości uzyskanych z wieloletnich obserwacji meteorologicznych. Rozkłady dotyczą dnia gorącego, ciepłego, chłodnego i zimnego.



Rys 5. Weryfikacja dobowego rozkładu temperatury obliczonego na podstawie modelu  
Fig. 5. Verification of 24-hour temperature distribution, calculated basing on developed model

Z rozkładu danych pochodzących z obliczeń i danych meteorologicznych wynika, że mimo drobnych odstępstw (maksimum  $1,5^{\circ}\text{C}$ ), z zaproponowanego modelu można korzystać przy obliczeniach termodynamicznych zjawisk zachodzących podczas przechowywania zbóż. Dla dni bardzo zimnych, gdy temperatura całodobowa jest ujemna, należy zakładać, że cała wilgoć znajdująca się w przestrzeniach międzyziarnowych przejdzie do wnętrza przechowywanego materiału.

## WNIOSKI

1. W trakcie przechowywania ziarna zbóż w silosach zachodzą zjawiska transportu ciepła i wilgoci, których charakter jest inny w każdej z wyróżnionych stref silosu.
2. Dla wykorzystania matematycznego modelu opartego na przeprowadzonej analizie zjawisk transportu ciepła i wilgoci w poszczególnych strefach silosu niezbędne są dane dotyczące rozkładu temperatury. Dla opisanego tego rozkładu (w sposób dyskretny – w cyklach dobowych i rocznych) można wykorzystać funkcję Legendre'a.



3. Do modelowania zjawisk transportu wilgoci zachodzących w silosach wymagane jest sprecyzowanie udziału konwekcyjnego transportu masy w całkowitym strumieniu wilgoci przenoszonym pomiędzy ziarnami. Zagadnienie to wymaga dalszych badań uwzględniających zmienną temperaturę otoczenia oraz zmienny rozkład ciśnienia wynikający z położenia ziaren w silosie.

## PIŚMIENNICTWO

- Hamadek H., Kamiński M., 2000. Measurement of Pressure Distribution Inside the Silo Model. Silos, Hoppers, Bins & Domes, Part IV, Trans Tech. Publications, Reinhard H. Voehlbir Editor-in-Chief.
- Klimek A., Kobiela S., 1999. Influence of Wall Flexibility on Normal and Tangential Loads in Silo. Powder Handling & Processing. Vol. 11, No. 3, July-September 1999.
- Kusińska E., 1998. Zjawiska towarzyszące migracji wilgoci w silosie zbożowym. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 454.
- Ledwoń K., Chmiel L., 1989. Wpływ mieszania na procesy wymiany masy w czasie suszenia nasion zbóż sorbentami naturalnymi. Zesz. Nauk. WSI w Opolu, nr 151.
- Ledwoń K., Słodczyk E., Suszanowicz D., 1998. Wykorzystanie przesuszonego ziarna jako naturalnego sorbentu w procesach konserwacji i przechowywania zbóż. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 454, cz. II.
- Słodczyk E., 1998. Możliwość wykorzystania pszenicy i kukurydzy jako naturalnego sorbentu. Inż. Roln. 2.
- Słodczyk E., 1998. Wykorzystanie przesuszonego ziarna jako naturalnego sorbentu w przechowywaniu zbóż. Praca doktorska UO, Opole.
- Suszanowicz D., 1999. Modelowanie procesu wymiany wilgoci w mieszaninie ziarna o różnej zawartości wody. Praca doktorska UO, Opole.

## MOISTURE TRANSPORT DURING THE STORAGE OF SEED IN SILO. PART I. THE MODEL OF MOISTURE TRANSPORT IN BED

**Abstract.** The analysis of moisture transport bed stored in silo has been presented. The models of the transport in the bed in different silo zone have been proposed. The zones different in terms of moisture transport mechanism have been distinguished. It was stated that the key factor deciding of wetting and drying the wheat in silo is a twenty-four and one-year cycle of temperature change.

**Key words:** wheat silo, moisture transport, transport components

*Marian Szarycz, Ryszard Kramkowski, Eugeniusz Kamiński, Klaudiusz Jałoszyński, Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, ul. Chelmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław*