

Laszlo Kocsis

Węgierski Instytut Inżynierii Rolniczej

Csaba Meszaros, Istvan Farkas

Uniwersytet Św. Stefana, Wydział Fizyki i Automatyki

STUDIA NAD PRZEPLÝWEM MASY W SUSZARNIACH O PRZEPLÝWIE MIESZANYM

Streszczenie

Suszenie jest jednym z waŹniejszych i najbardziej niezbędných zabiegów w produkcji rolnej. Około 30% ziarna po zbiorze wymaga suszenia. Proces suszenia jest jednak bardzo energochłonny, a w wielu przypadkach nieprzyjazny dla środowiska ze względu na spalanie paliw kopalnych w celu uzyskania niezbędnej energii cieplnej. ChociaŹ suszarnie o przepływie mieszanym są szeroko stosowane, wciąż istnieje potrzeba optymalizacji wielu procesów cząstkowych. Na przykład, występują duże różnice w prędkości pionowej partii ziarna, co powoduje różnice w czasie ich ekspozycji. W rezultacie mamy do czynienia z nierównomiernym wysychaniem, a w konsekwencji z niedosuszeniem lub przesuszeniem poszczególných partii materiału. Przeprowadzone badania miały na celu określenie oddziaływania ścianek komory suszenia oraz daszkowych kanałów powietrznych, na rozkład prędkości masy ziarna. Opracowanie przedstawia wyniki doświadczeń z przepływem ziarna. W przyszłych działaniach przewiduje się opracowanie modelu PFC dla przepływu masy ziarna, co umożliwi doskonalsze prognozowanie przebiegu procesu suszenia.

Słowa kluczowe: suszenie ziarna, przepływ masy, wilgotność ziarna, modelowanie

Wprowadzenie

Suszarnie o przepływie mieszanym działają często w kwasi-stacjonarnym trybie operacyjnym. W takim przypadku ziarno pozostaje nieruchome podczas prawie całego przebiegu suszenia. Okres czasu między dwoma rozładunkami może sięgać kilkunastu minut, podczas gdy czas rozładunku – okres, przez który urządzenie rozładunkowe jest otwarte – zajmuje kilka sekund. W takich suszarniach powietrze oraz ziarno są przemieszczane przez kolumnę suszarni jednocześnie, w trybie przepływu współprądowego, przeciwprądowego i poprzecznego [Pabis i in. 1998]. Ziarno zostaje stopniowo przemieszczane ku dołowi kolumny suszarni. Przy każdym rozładunku

przyjmuje się, że warstwa ziarna przesuwana się na wzór tłoka. Zakłada się również, że materiał w warstwie stanowi połączenie serii warstw pojedynczych ziaren, których przebieg suszenia jest opisany za pomocą modelu pojedynczego ziarna [Farkas, Rendik 1996].

Wpływ różnych form przewodów powietrznych na przepływy ziarna i powietrza przez suszarnię o przepływie mieszanym, był już badany przez Klingera [1997]. Przyjęto model suszarni jako serii współ- i przeciwprądowych elementów. Taką samą koncepcję modelu skutecznie zastosowano przy prognozowaniu ogólnego funkcjonowania suszarni oraz wpływu zmiennych operacyjnych na przebieg procesu suszenia [Bruce 1984]. W dynamicznej formie został on również użyty do konstrukcji automatycznego sterownika suszarni [McFarlane, Bruce 1991].

Cenkowski i in. [1990] badali eksperymentalnie wzorce przepływu powietrza w suszarni o przepływie mieszanym. Ustalili oni, że około 30% objętości kolumny suszarni funkcjonuje w konfiguracji przepływu poprzecznego. Giner i in. [1988a] opracowali dwuwymiarowy model suszarni o przepływie mieszanym, obejmujący elementy przepływu poprzecznego. Aby obliczyć proces suszenia ziarna dla każdego z elementów – współprądowego, przeciwprądowego i poprzecznego przepływu, niezbędna jest przede wszystkim znajomość przebiegu procesów przepływu masy i powietrza.

Aktualne publikacje na temat modelowania suszarni do ziarna na gorące powietrze, rozpatrują przepływ poprzeczny oraz suszenie pojedynczego ziarna [np. Rumsey i Rovedo 2001; Jia i in. 2002; Sitompul i in. 2003; Wu i in. 2004].

Niniejsza publikacja dotyczy analizy pomiarów przepływu masy ziarna w suszarni o przepływie mieszanym, przy użyciu ziarna pszenicy jako materiału badawczego. Równolegle badano modele przepływu powietrza. W pracy przedstawiono pierwsze wyniki doświadczeń z przepływem ziarna.

Układ doświadczeń

Doświadczenia z przepływem masy (ziarna), jakie przeprowadzono na eksperymentalnej suszarni o przepływie mieszanym w ATB Poczdam, zilustrowały, w jaki sposób warstwa materiału przemieszcza się w takiej suszarni. Wykazały również, jak wielkie mogą być różnice wynikające ze zróżnicowania czasu ekspozycji przepływającej masy ziarna.

Próbki ziarna pszenicy o wilgotności 12-14% były użyte jako materiał tworzący warstwę. Doświadczalna suszarnia składa się z dwóch jednakowych kolumn. Ściankę lewej kolumny stanowi pokrycie z przezroczystego pleksi-glasu (rys. 1), dzięki czemu jest ona użytkowana do eksperymentalnych badań procesu suszenia; kolumna prawa natomiast służy do rzeczywistych doświadczeń z suszeniem. Do badań z masą materiału użyto lewej kolumny.

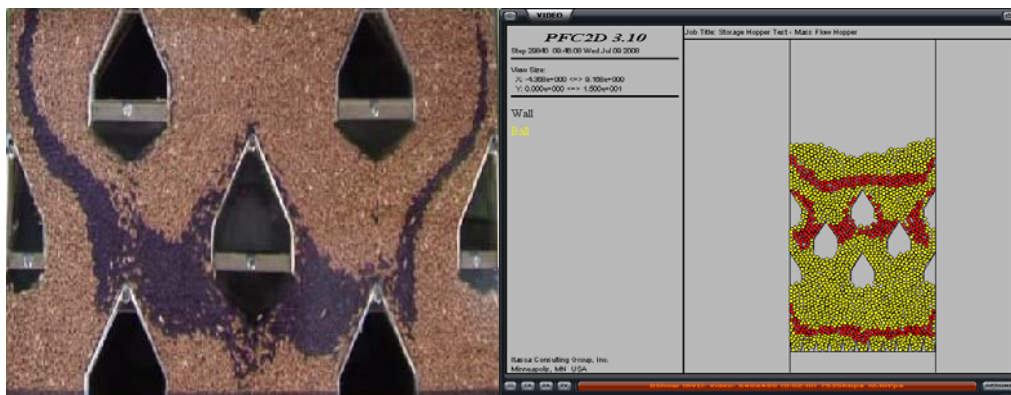


*Rys. 1. Układ doświadczalnej suszarni ATB ze ścianką z przezroczystego pleksiglasu
Fig. 1. Layout of ATB test dryer with Plexiglas® wall*

Przebieg doświadczenia był rejestrowany za pomocą kamery wideo i analizowany przez specjalny program komputerowy. Kamerę wideo umieszczono na stanowisku na wprost najniższego daszkowego kanału powietrznego (na średnim poziomie, co eliminowało zniekształcenia obrazu). Obrazy wideo rejestrowano z częstotliwości 50 na sekundę. Szybki ruch wideosekwencji umożliwiał lepszy wgląd w przebieg procesu szybkiego przemieszczania się warstwy materiału. Rozdzielczość obrazów była również wystarczająco wysoka, aby umożliwić dokładne rozpoznanie pojedynczych nasion.

Badania przepływu masy

Doświadczenia prowadzono stosując krótszy (300 ms) i dłuższy (1000 ms) czas wyładunku, aby porównać różnice w ilościach doprowadzanego ziarna. Wykonano również badania z zabarwionymi pojedynczymi nasionami oraz zabarwionymi warstwami ziarna pszenicy (rys. 2). Przebiegi zabarwionych ziaren były rejestrowane przez videokamerę i analizowane komputerowo. W powiązaniu z rejestracją czasu możliwa jest szczegółowa obserwacja procesów przepływu ziarna przez te same kamery wideo. Bazując na pomiarach wykonano dwuwymiarową symulację w celu porównania wyników. Do symulacji zastosowano te same wymiary suszarni oraz parametry fizyczne ziarna, jakie występowały w doświadczeniach z suszarnią pilotową.



Rys. 2. Zabarwiona warstwa ziarna w doświadczalnej suszarni podczas wysypu oraz w dwuwymiarowej symulacji

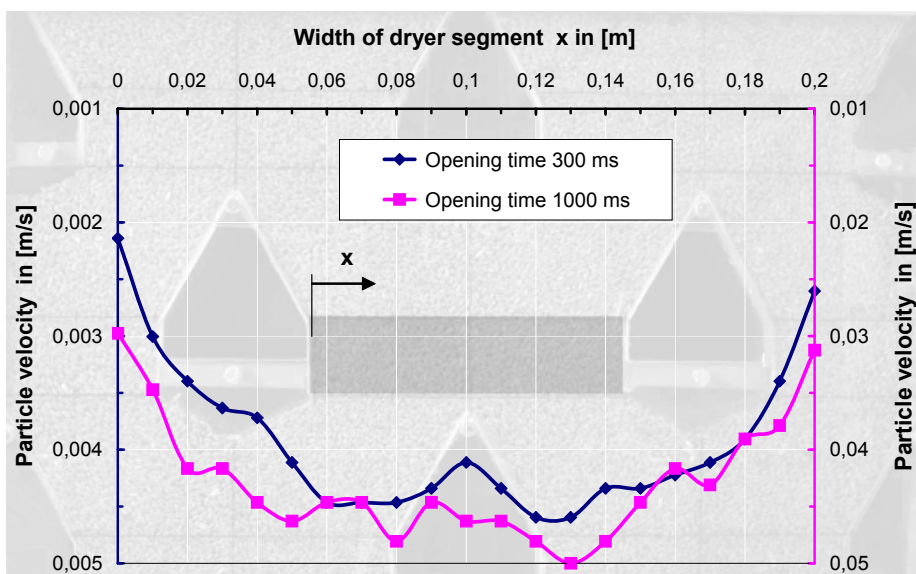
Fig 2. Colored grain layer in the test dryer during discharge and the 2D in simulation

Na rysunku 2 widać wyraźnie, że pszenica zasypywana do środkowej części suszarni sływa wyraźnie szybciej, niż w warstwach tuż przy ściankach bocznych, gdzie tarcie o ścianki hamuje przepływ. Dlatego też kolumna uformowana z ziarna pośrodku komory suszenia przemieszcza się wyraźnie szybciej, niż w pozostałych zewnętrznych partiach komory. Tym samym masa ziarna pozostaje w suszarni przez różne okresy czasu, co w rezultacie prowadzi do nierównomiernego rozkładu wilgotności materiału. Ta duża różnica w natężeniu przepływu ziarna musi być zredukowana odpowiednimi metodami.

Rysunek 3 przedstawia graficznie wyniki pomiarów dla centralnej sekcji komory suszenia. Pojedynczy wykres ma dwie osie y (prędkość ziarna, m/s) dla każdego z dwóch badanych wariantów. Tylko na wykresie o takim układzie przepływ ziarna może być porównywalny dla dwóch prędkości przepływu. Można również łatwo stwierdzić, że przy większym natężeniu przepływu różnice prędkości są mniejsze niż przy mniejszym natężeniu. Zjawisko to wynika z faktu, że przy większych natężeniach przepływu ziarno ma silniejszy impuls i efekt tarcia o ścianki jest słabszy. Różne zakresy mierzonych wielkości są widoczne na rysunku 4. Przeciętne prędkości ziarna oznaczone dla doświadczeń przy 300 i 1000 ms otwarcia wysypu, zachodzą na siebie.

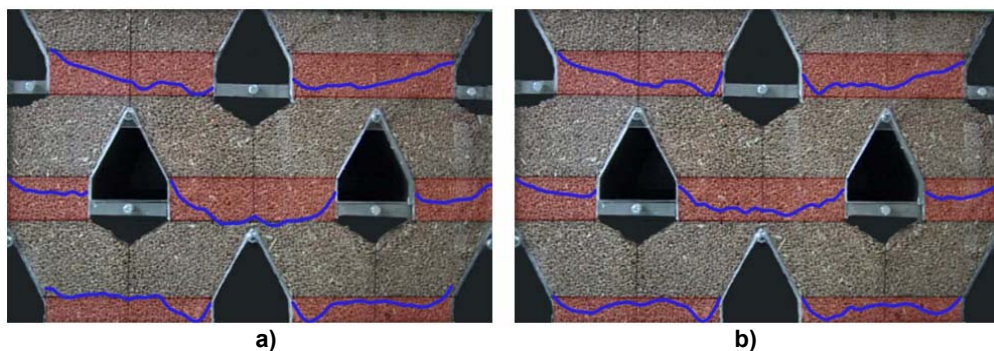
Na rysunku 4 wpływ tarcia o ściankę jest łatwo dostrzegalny. Ponad szczytami daszkowych kanałów osuwające się wilgotne ziarno tworzy silne załamania przepływu w tych miejscach. Skośne ścianki daszków wywołują mniejsze zaburzenia. Występuje także osuwanie się ziarna z pionowych ścianek kanałów daszkowych, które zmniejsza grubość warstwy na tym poziomie suszarni. Pod każdym daszkowym kanałem zsuwające się ziarna przyspieszają się wzajemnie, aż do strefy osiadania ponad szczytem następnego daszku, gdzie niektóre ziarna zostają silnie wyhamowane. Po szczególne ziarna zsuwające się pod każdą połowę daszku są hamowane

przez tarcie o ścianki pod tymi połówkami. Bezpośrednio obok ścianki formowana jest cienka warstwa ziarna, gdzie pojedyncze ziarna zsuwają się ku dołowi znacznie wolniej, niż warstwy leżące bliżej środka kolumny. Strefa osiadania ponad dolną połowę szczytu daszku powoduje dalsze dodatkowe wyhamowania osiadania.



Rys. 3. Pionowe prędkości ziaren mierzone przy frontowej ścianie komory między dwoma daszkowymi kanałami przy czasie otwarcia 300 i 1000 ms: szerokość segmentu suszarni (m), czas otwarcia 300 ms, prędkość ziarna (m/s), czas otwarcia 1000 ms

Fig. 3. Vertical particle velocities measured at the front wall between two air ducts at 300 ms and 1000 ms opening time



Rys. 4. Jakościowy rozkład prędkości ziaren na pionowym przekroju w dolnej części suszarni: a– przy czasie otwarcia 300 ms, b– przy czasie otwarcia 1000 ms

Fig. 4. Qualitative particle velocity distribution over the vertical cross-section in the bottom part of the dryer: a) at 300 ms opening time; b) at 1000 ms opening time

Doświadczenia te zostały wykonane na trzech najniższych poziomach daszków. Urządzenie wysypowe jest umiejscowione 26 cm poniżej dwóch ostatnich kanałów powietrznych. Pominięte kanały powietrzne i pobliskie urządzenie wysypowe powodują zmianę wykresu prędkości ziarna mierzonej pomiędzy najniższymi daszkami. Poniżej ostatnich daszków nie ma już zakłócających czynników zawężających czy utrudniających osiadanie, jak kolejne szczyty daszków czy ścianki dachowe. Ta strefa, bezpośrednio ponad wysypem, działa jak pamięć wyrównawcza, przed wysypem ziarna z suszarni. Przy różnych prędkościach zasilania nie obserwowano wyraźnych różnic w relacjach przepływu ziarna. Mieszanie materiału luzem jest w niewielkim stopniu zależne od prędkości zasilania. Doświadczenia z przemieszczaniem materiału luzem wykazały natomiast duży wpływ tarcia o ścianki.

Pomiary rozkładu przepływu masy ziarna

Regulacja jednorodności zasilania ziarnem była testowana przy czasach otwarcia spustu 300 ms i 1000 ms, które stosowano podczas realnego suszenia. Do separacji wysypywanej masy ziarna użyto 40 profilowanych komórek aluminiowych o wymiarach: długość 80 mm, szerokość 80 mm, głębokość 200 mm, rozstawionych w formie kraty; zaostrome krawędzie komórek miały na celu zredukowanie niedokładności pomiarów rozkładu przepływu masy pod punktami wysypu z suszarni (rys. 5). Zaprojektowana krata pomiarowa została umieszczona tuż pod wylotem urządzenia wysypowego, aby możliwie najdokładniej zilustrować rozkład przepływu masy ziarna na wylocie z komory suszenia. Po każdym rozładunku określano masę ziarna z każdej komórki osobno, używając wagi cyfrowej (błąd pomiaru 0,005 kg), a także mierzono wilgotność próbek.

Podczas pomiarów na suszarni przemysłowej wysyp masy ziarna miał charakter ciągły. Próbkę były pobierane z miejsc wokół ostatnich daszkowych kanałów powietrznych, za strefą chłodzenia (rys. 6). Z każdego kanału powietrznego pobierano 1 kg próbki ziarna przez frontową ściankę komory suszenia. Temperaturę i wilgotność próbek mierzono bezpośrednio po ich pobraniu.

Ocena pomiarów przepływu masy ziarna

Na podstawie średnich wartości z 5 pomiarów wykonane zostały wykresy (rys. 7), które bardzo dobrze ilustrują fluktuację zawartości wilgoci spowodowaną przez rozkłady przepływu masy ziarna podczas wyładunku.

Na wykresach wyników pomiarów widać wyraźnie, jak rozwija się przepływ „łtokowy” w suszarni przy różnych czasach otwarcia wysypu. W związku z tym przepływ masy nie jest jednolity, co powoduje także nierównomierne wysychanie ziarna. Efekt ten można zauważyć także na wykresie pomiarów w suszarni przemysłowej, gdzie nierówny załadunek suszarni zwiększa nierównomierność suszenia.



Rys. 5. Zestaw do pomiaru rozkładu przepływu masy ziarna przy wysypie z suszarni pilotowej
Fig. 5. Set-up for measuring the mass flow distribution at discharge by the pilot dryer

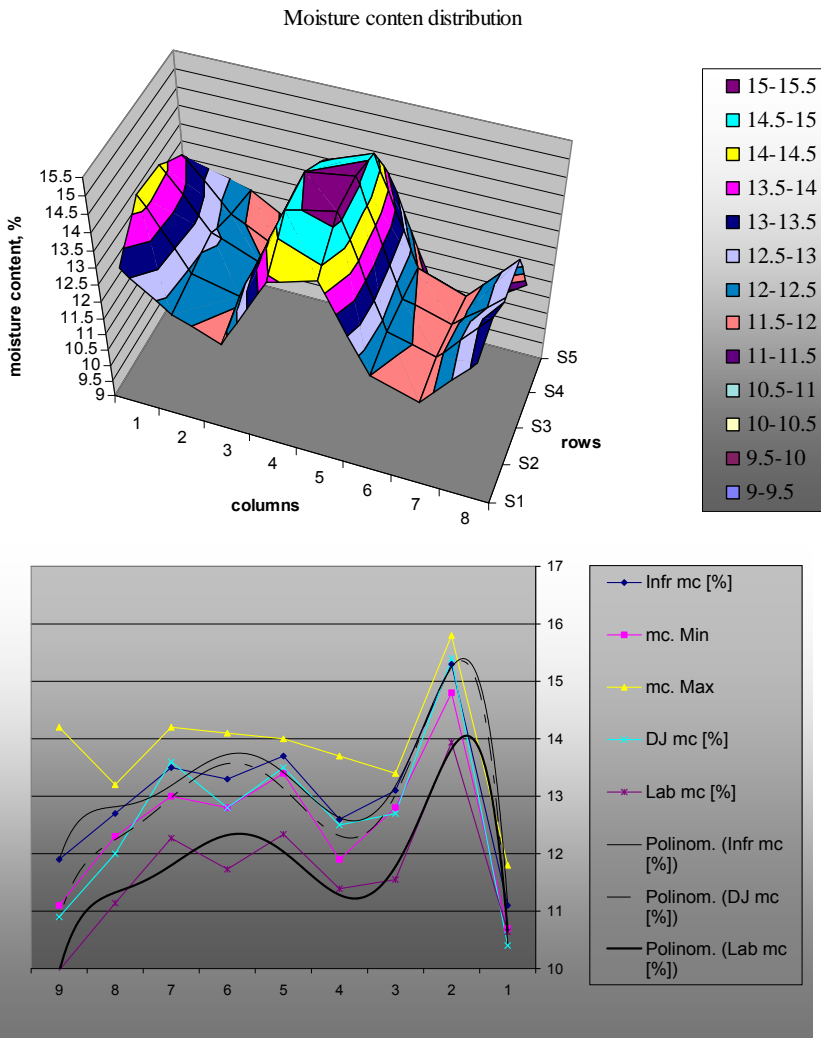


Rys. 6. Pobieranie próbek ziarna z suszarni przemysłowej
Fig. 6. Sampling from the industrial dryer

Po przeanalizowaniu wyników pomiaru rozkładu przepływu masy ziarna oraz termoo obrazów, wyniki wykazują niespodziewany efekt. W świetle poprzednich pomiarów rozkładu przepływu masy ziarna spodziewano się rozkładu wilgotności podobnego do rozkładu przepływu masy. Jednakże wyniki pomiarów rozkładu przepływu masy wykazały między sobą duże różnice, co oznacza, że rozkład wilgotności jest zależny od rozkładu przepływu masy tylko częściowo.

Podsumowanie

Badania były przeprowadzone na pilotowej suszarni w ATB Poczdam oraz na jednej suszarni przemysłowej na Węgrzech, z użyciem ziarna zbóż (pszenicy) jako materiału testowego. Kolumna w suszarni pilotowej była wyposażona w przezroczystą ściankę frontową z pleksiglasu. Do pomiaru rozkładu prędkości pionowej ziaren przy ścianie użyto wideokamery o dużej prędkości (do 50 klatek/sekundę). Kamera była stosowana również do zobrazowania niejednorodności przepływu masy ziarna, wynikłej z tarcia o ścianki, zarówno boczne komory suszenia, jak i ścianki daszkowych kanałów powietrznych. W tym celu pojedyncze zabarwione ziarna, a także warstwy zabarwionych ziaren, były wprowadzane na wierzchołek suszarni, a następnie przesuwaly się w dół komory suszenia. Ponadto mierzono rozkład przepływu masy ziarna przy wysypie z suszarni. W suszarni przemysłowej pobieranie próbek było możliwe tylko z frontowej ścianki suszarni; tu również obserwowano duże różnice, podobnie jak przy pomiarach na suszarni pilotowej.



Rys. 7. Rozkład wilgotności ziarna w suszarni pilotowej oraz suszarni przemysłowej
rozkład wilgotności wilgotność, %; kolumny; rzędy

Fig. 7. Distribution of grain moisture content in the pilot and in the industrial dryer

Doświadczenia z przepływem masy ziarna wykazały, że oddziaływanie ścianek bocznych komory suszenia jest istotnym powodem nierównomierności przepływu ziarna. W rezultacie, duże różnice w czasie przebywania poszczególnych porcji ziarna w suszarni o przepływie mieszanym powodują nierównomierne ich wysychanie, a zatem ziarno może być przesuszone lub niedosuszone. Oznacza to, że prowadzony aktualnie proces suszenia przebiega przy stosunkowo wysokich stratach, zaś zużycie energii nie jest efektywne. W świetle wyników uzyskanych w suszarni pilotowej, dotyczących przepływu masy i rozkładu wilgotności ziarna, pomiary te można rozszerzyć również na rozkład zawartości wilgoci w ziarnie opuszczającym suszarnię.

Celem jest uzyskanie jednolitego rozkładu wilgotności przy wyładunku ziarna oraz osiągnięcie jednorodnego przepływu masy ziarna, zarówno w procesie suszenia, jak w urządzeniu rozładunkowym.

Mając na celu opracowanie modelu matematycznego przepływu masy ziarna w suszarniach o przepływie mieszanym, przeprowadzono wstępne badania prędkości ziaren oraz rozkładu przepływu masy ziarna. Przedmiotem przyszłych prac będzie kontynuacja modelowania dwuwymiarowego, jak również modelowanie w 3. wymiarze przepływu masy ziarna. Taki model posłuży do optymalizacji aparatury suszarni, systemu wyładunku ziarna, a także kształtu i rozstawienia kanałów powietrznych.

Bibliografia

Bruce D.M. 1984. Simulation of Multiple-Bed Concurrent-, Counter-, and Mixed-Flow Grain Driers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 30, s. 361-372

Cenkowski S., Miketinac M.J., Kelm A.W. 1990. Airflow patterns in a mixed-flow dryer. *Canadian Agricultural Engineering*, Vol. 32, s. 85-90

Farkas I., Rendik Z. 1996. Block oriented modeling of drying processes. *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 42, s. 213-219

Giner S.A., Bruce D.M. and Mortimore S. 1998a. Two-Dimensional Simulation Model of Steady-State Mixed-flow Grain Drying. Part 1: The Model. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 71, s. 37-50

Giner S.A., Bruce D.M. 1998b. Two-Dimensional Simulation Model of Steady-State Mixed-flow Grain Drying. Part 2: Experimental Validation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 71, s. 51-66

Jia C., Yang W., Wu B. 2002. Mathematical Modeling and Glass Transition Mapping for Rice Drying in a Cross-flow Dryer. 2002 ASAE Annual International Meeting, Hyatt Regency, Chicago, Illinois, USA, July 29-31, ASAE Paper Number 02-6073

Klinger J. 1977. Einige thermodynamische und strömungstechnische Untersuchungen zur Modellierung der Vorgänge in Dächerschachttrocknern für Getreidekörner. PhD Dissertation, TUV Dresden

McFarlane N.J.B., Bruce D.M. 1991. Control of Mixed-flow Grain-driers: Development of a Feedback-plus-Feedforward Algorithm. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 49, s. 243-258

Pabis S., Jayas D.S., Cenkowski S. 1998. *Grain Drying*. Wiley & Sons, New York

Rumsey T.R., Rovedo C.O. 2001. Two-dimensional simulation model for dynamic cross-flow rice drying. *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 40, s. 355-362

Sitompul J.P., Stadi I., Sumardiono S. 2003. Modelling and Simulation of Momentum, Heat, and Mass Transfer in a Deep-Bed Grain Dryer. *Drying Technology*, Vol. 21, s. 217-229

Wu B., Yang W., Jia C. 2004. A Three-dimensional Numerical Simulation of Transient Heat and Mass Transfer inside a Single Rice Kernel during the Drying Process. *Biosystems Engineering*, Vol. 87, s. 191-200

*Autorzy wyrażają wdzięczność dla Instytutu ATB w Poczdamie
za udzieloną pomoc i współpracę.*