

WPŁYW SPOSOBU FORMOWANIA ZŁOŻA PSZENICY NA OPÓR PRZEPŁYWU POWIETRZA

Józef Łukaszuk, Marek Molenda, Józef Horabik

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: jlukas@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań wpływu sposobu formowania złożeń oraz prędkości przepływu V powietrza na spadek ciśnienia Δp powietrza w próbkach ziarna pszenicy o wilgotności 10%. Próbkę miała kształt sześcianu o boku 0,35 m i zawierała około 35 kg ziarna. Zastosowano trzy sposoby napełniania aparatu, które umożliwiały wytworzenie próbek o różnej strukturze i gęstości od $768,6 \pm 1$ do $831 \pm 0,4$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Badania przeprowadzono dla jedenastu poziomów prędkości przepływu V powietrza w zakresie od 0,03 do $0,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz dla przepływu powietrza przez złoże pszenicy w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach: pionowym (Z) i poziomych (X i Y). Wyniki badań wykazały, że próbki o wyższej gęstości stawiały większy opór przepływu powietrza. Stwierdzono, że opór przepływu zależy od kierunku przepływu. Przy prędkości przepływu $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w próbkach formowanych osiowo symetrycznie tylko pod działaniem grawitacji oraz zagęszczanych (metody A i C) opór przepływu był w kierunku pionowym o 50% (A) albo 38% (C) wyższy niż w kierunkach poziomych. W próbkach napełnianych asymetrycznie (przez zasypnik klinowy – metoda B) opory przepływu w kierunkach poziomych nie były równe. W tym przypadku przy prędkości przepływu $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ opór przepływu w kierunku Z był o 30% wyższy niż w kierunku X oraz o 93% wyższy niż w kierunku Y. Tej wielkości zmiany oporu przepływu mogą wystąpić w praktyce i powinny być uwzględniane w projektowaniu procesów oraz użytkowaniu urządzeń w technologiach wykorzystujących przepływ gazów przez złoże, takich jak: suszenie, przewietrzanie, chłodzenie czy dezynsekcja.

Słowa kluczowe: ziarno pszenicy, gęstość, opór przepływu

WSTĘP

Zależność oporu przepływu od prędkości przepływu powietrza przez złoże rolniczego materiału granularnego jest zazwyczaj przedstawiana w formie równań bądź tabel [2]. Najczęściej zakłada się przy tym, że opór przepływu jest stały w objętości złożeń i nie zależy od struktury upakowania. Liczne wyniki badań wskazują, że założenia te nie są prawdziwe. W praktyce lokalne zmiany oporu

przepływu w różnych regionach złoża mogą powodować zaburzenia procesów technologicznych wykorzystujących przepływ gazów takich jak suszenie, przewietrzanie, chłodzenie czy dezynsekcja. Według autorów Nawarro i Nojesa [9] wartości oporu obliczone z zalecanych wzorów lub odczytane z tabel odnoszą się do ziarna luźno upakowanego, czystego i dotyczą przepływu w kierunku pionowym, a w efekcie są niższe niż w układach rzeczywistych. Autorzy ci wskazują ponadto, że efektywność systemów przewietrzania w zasadniczym stopniu zależy od równomierności przepływu powietrza w całej objętości złoża.

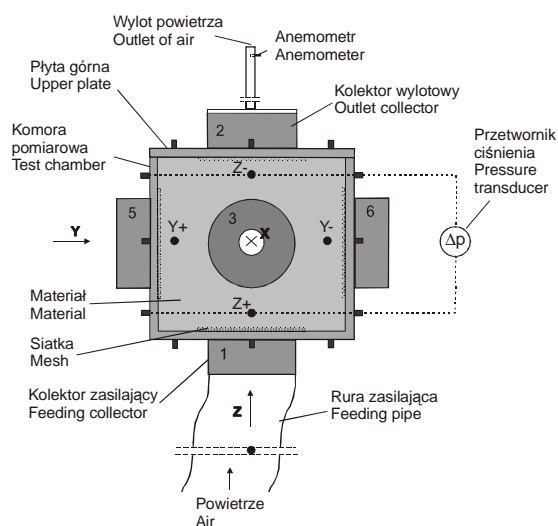
Najwcześniej badano wpływ gęstości materiału (związanej z porowatością) na opór przepływu powietrza. Calderwood [3] badając złoża różnych form ryżu wykazał, że gęstość usypna złoża zasadniczo wpływa na opór przepływu. Stephens i Foster [11] w eksperymentach na komercyjnym silosie napełnianym kukurydzą zaobserwowali, że opór przepływu wzrasta trzykrotnie, w stosunku do napełniania zwartym strumieniem, kiedy przy napełnianiu zastosowali rozrzutnik ziarna. Podobny program badań wykonany na pszenicy i sorgo [12] wskazał, że napełnianie z rozrzutnikiem zwiększa opór przepływu o 110% w złożu sorgo i o 101% w złożu pszenicy. Za prawdopodobną przyczynę autorzy uznali różną zawartość cząstek drobnych w badanych materiałach, która wynosiła od 1,5 do 2% w przypadku sorgo oraz 0,2% dla pszenicy. W złożu, gdzie drobnych cząstek było więcej wypełniały one pory pomiędzy większymi ziarnami.

Eksperymenty wskazują, że kierunek przepływu wpływa również na opór. Kumar i Muir [7] badając złożę pszenicy i jęczmienia stwierdzili, że przy prędkości przepływu $0.077 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ opór przepływu w kierunku pionowym jest do 60% wyższy niż w kierunku poziomym. Hood i Thorpe [6] badając opór powietrza dziesięciu różnych ziół nasion przy prędkości przepływu do $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wykazali, że opór przepływu w kierunku pionowym jest około dwukrotnie wyższy niż w kierunku poziomym. Zgodnie z normą ASAE D272.3 [1] dla szeregu wyszczególnionych nasion wartość oporu przepływu w kierunku poziomym równa jest od 60 do 70% oporu przepływu w kierunku pionowym. Równocześnie norma ta informuje, że dla niektórych nasion może nie być różnicy. Neethirajan i in. [10] zastosowali technikę rentgenowskiej tomografii obliczeniowej dla objaśnienia różnicy oporu przepływu w kierunku pionowym i poziomym w złożach utworzonych z pszenicy, jęczmienia, siemienia lnianego, grochu i gorczycy. Autorzy stwierdzili, że przestrzenie powietrzne są rozłożone równomiernie w złożach nasion o kształcie bliskim kuli. W przypadku nasion o kształcie wydłużonym: pszenica, jęczmień, siemię lniane, powierzchnia i długość porów w kierunku poziomym była o 100% większa niż w kierunku pionowym, podczas gdy w przypadku grochu i gorczycy różnica wynosiła 30%. Autorzy wnioskują, że dla nasion wielu gatunków roślin przyczyną różnicy oporu przepływu powietrza w kierunkach pionowym i poziomym jest niejednorodny rozkład porów i ich liczba w złożu.

Celem prezentowanych badań jest oszacowanie różnic oporu przepływu powietrza w trzech kierunkach przez sześcienną próbkę pszenicy formowaną trzema metodami.

MATERIAŁ I METODA

Pomiary przeprowadzono na oczyszczonym ziarnie pszenicy ozimej odmiany Rysa o wilgotności 10%. Pomiaru spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez złożę dokonywano na stanowisku umożliwiającym badanie przepływu powietrza przez materiał w trzech kierunkach (rys. 1). W skład stanowiska wchodzi dwa bloki.



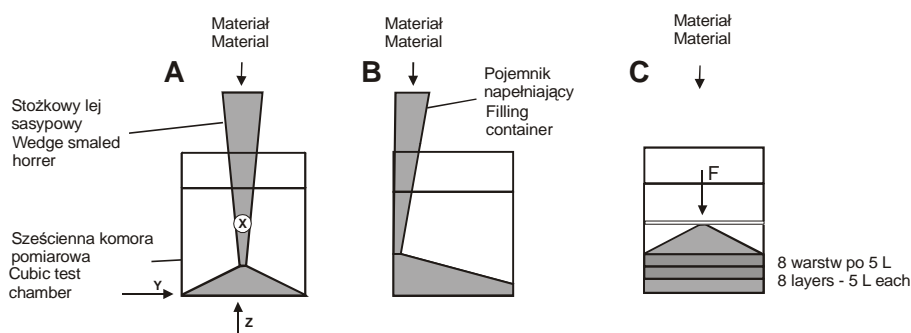
Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczenia spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez sześcienną próbkę materiału granularnego

Fig. 1. Experimental setup for determination of airflow resistance of cubic sample of granular material

Pierwszy to zespół zasilający wyposażony w wentylator promieniowy o mocy 0,37 kW i zbiornik wyrównawczy o pojemności 0,09 m³. Drugi blok to sześcienna komora pomiarowa o boku 0,35 m (objętość 0,043 m³) i stół pomocniczy. W każdej ścianie komory wykonano otwory o średnicy 0,16 m, które od wewnątrz przesłonięto blachą perforowaną. Otwory perforacji miały średnice 2 mm, przy czym prześwit perforacji stanowił 29,7% powierzchni, co zgodnie ze standardem ASAE D273.2 [1] zapewnia, iż przesłona nie stawia istotnego oporu przepływowi powietrza. Na każdej ścianie komory zamontowano cylindryczne kolektory (zasilające lub wylotowe) o średnicach 0,16 m oraz 4 króćce, do których przyłączano przewody pneumatyczne przetwornika ciśnienia. Aby uniknąć

najsilniejszych zaburzeń przepływu, występujących w sąsiedztwie ściany, pomiary spadku ciśnienia wykonywano na długości złoża równej 0,25 m. Zastosowano indukcyjny czujnik różnicy ciśnień Validyne DP45, o maksymalnym ciśnieniu 2,25 kPa, współpracujący ze wzmacniaczem Validyne CD15. Prędkość przepływu powietrza w przewodzie wylotowym mierzono anemometrem ANT 2000 z dokładnością $0,1 \text{ m s}^{-1}$, a następnie przeliczano, uwzględniając rzeczywisty przekrój pustej komory pomiarowej. Prędkość przepływu powietrza przez komorę pomiarową, w zakresie $0,03 \text{ m s}^{-1}$ do $0,35 \text{ m s}^{-1}$, regulowano przy pomocy uchylnej przysłony umieszczonej na otworze ssącym wentylatora.

W zależności od przyjętego kierunku przepływu powietrza, przyłączano przewody, zasilający i wylotowy, do odpowiednich kolektorów. Czujnik anemometru i przewody pneumatyczne przetwornika ciśnienia także przenoszono we właściwe miejsca układu. Króćce nieużywane w bieżącym eksperymencie zaślepiano korkami. Kolektory nie biorące udziału w eksperymencie zamykano elastycznymi przesłonami lateksowymi. Pomiary wykonano kolejno w kierunkach: Z, X i Y, powtarzając cykl trzy razy. Dla uzyskania różnych struktur upakowania złoża zastosowano trzy metody napełniania komory pomiarowej, które przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Metody napełniania komory pomiarowej aparatu
Fig. 2. Methods of filling of test chamber of the apparatus

W pierwszej (metoda A) wykorzystano stożkowy lej zasypowy o wysokości 1 m i średnicach otworów 0,03 i 0,2 m. W drugim (metoda B) komorę napełniano przy pomocy pojemnika, którego szerokość odpowiadała szerokości komory pomiarowej (0,35 m), a szerokości szczelin zasypowej i wylotowej wynosiły, odpowiednio 0,15 m i 0,015 m. W obu przypadkach napełnianie polegało na powolnym unoszeniu, wcześniej napełnionych pojemników zasypowych, z zachowaniem ciągłego wypływu strumienia ziarna. Ograniczona pojemność zasobników zasypowych, wymuszała wykonanie kilku cykli napełnień. Komorę napełniano z nadmiarem ziarna, a następnie usuwano jego nadmiar, wyrównując górną powierzchnię złoża mate-

riału przesuwnym elementem stanowiska. Trzeci sposób napełniania (metoda C), podobnie jak w przypadku metody A polegał na napełnianiu komory pomiarowej przy pomocy leja zasypowego, ale warstwami ziarna (8 warstw) o objętości ok. 5 L każda, które kolejno zagęszczano uderzając 10 razy obciążnikiem o masie 4 kg w spoczywającą na warstwie ziarna poziomą płytę pomocniczą.

Konstrukcja stanowiska badawczego i przyjęta metodyka pomiarów zapewniły przebieg eksperymentów bez drgań i wibracji mogących wpływać na zmianę właściwości fizycznych badanych próbek.

Pomiary wykonywano w trzech powtórzeniach (napełnieniach komory pomiarowej). Otrzymane wyniki aproksymowano równaniem Erguna (1) [4]:

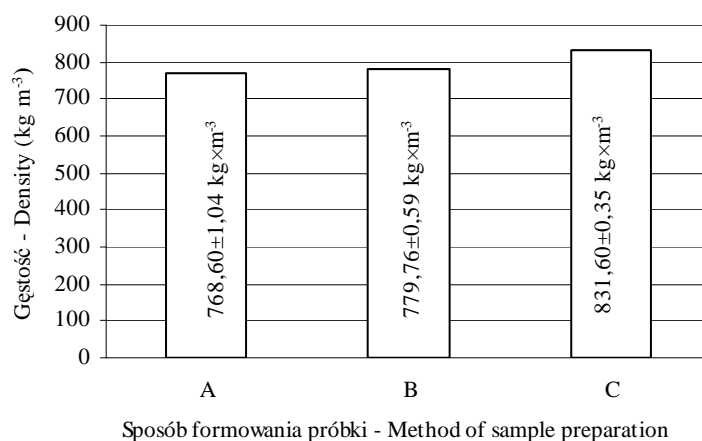
$$\Delta p = a \cdot V + b \cdot V^2, \quad (1)$$

gdzie: Δp – spadek ciśnienia powietrza na długości warstwy materiału złoża 0,25 m, a i b – parametry, V – prędkość przepływu powietrza.

WYNIKI

Zmienność gęstości próbek

Metoda formowania próbki w znacznym stopniu zmienia gęstość złoża pszenicy (rys. 3).



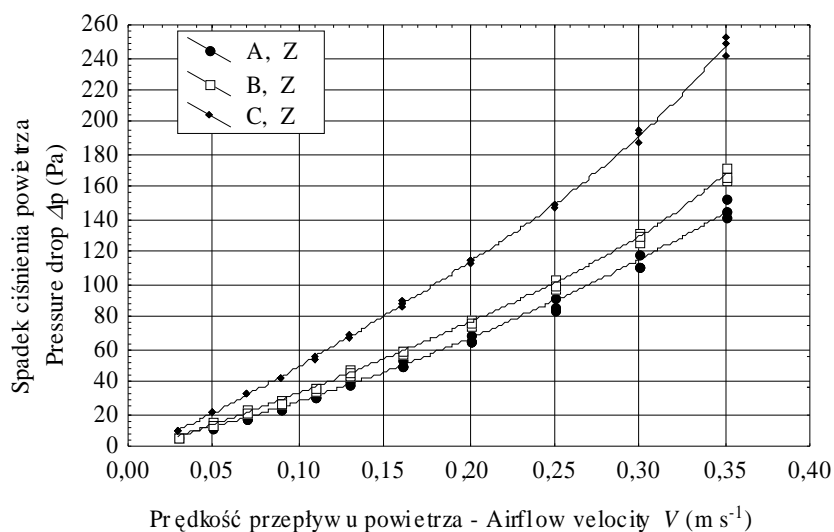
Rys. 3. Średnia gęstość próbek i odchylenia standardowe dla trzech sposobów napełniania komory aparatu

Fig. 3. Mean densities and standard deviations of wheat samples for three methods of test chamber filling

Metoda A skutkowała najniższą gęstością usypną $768,6 \pm 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, a najwyższą gęstość $831,6 \pm 0,35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (1,08 większą) otrzymano przy napełnianiu komory metodą C polegającą na ubijaniu kolejnych warstw złoza. Poszczególne metody charakteryzowały się też otrzymywaniem różnych rozrzutów gęstości. Najwyższą powtarzalność, z odchyleniem standardowym 0,35, dawała metoda C.

Wpływ gęstości na opór przepływu

Zmiany gęstości złoza pszenicy wpływają na opór przepływu powietrza. Na rysunku 4 przedstawiono zależność spadku ciśnienia Δp na długości 0,25 m od prędkości przepływu V dla przepływu w kierunku pionowym oraz trzech metod napełniania komory pomiarowej. Opór przepływu rósł z przyrostem gęstości złoza i zmierzony spadek ciśnienia Δp , przy prędkości V równej $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, wyniósł $112,9 \pm 4,3 \text{ Pa}$ w przypadku napełniania metodą A, a przy napełnianiu metodą C wyniósł $192,0 \pm 3,7 \text{ Pa}$, był więc 1,7 razy wyższy. Uzyskano więc 1,7 razy większy spadek ciśnienia przy zwiększaniu gęstości złoza pszenicy z $768,6 \pm 1,04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ do $831,6 \pm 0,35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



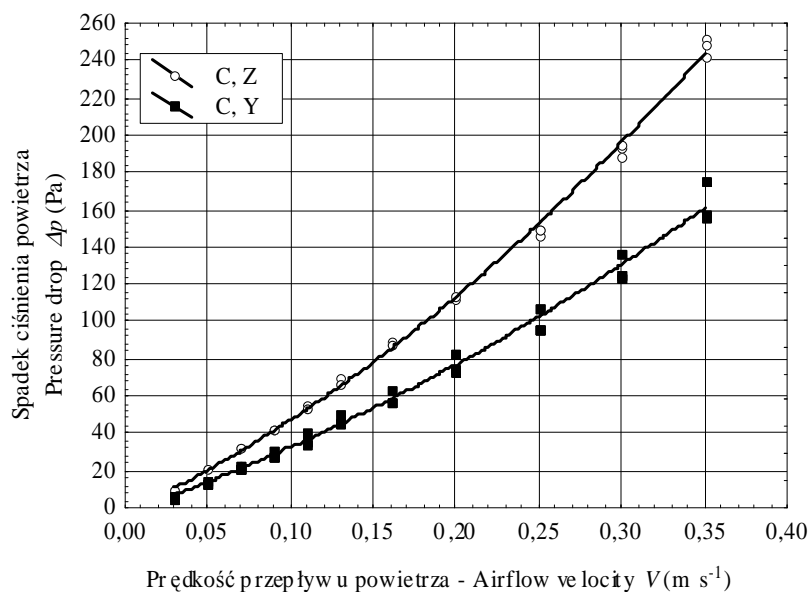
Rys. 4. Zależność spadku ciśnienia Δp od prędkości przepływu V powietrza w kierunku pionowym Z dla trzech metod napełniania komory aparatu: A, B, C

Fig. 4. Relationships between pressure drop Δp and airflow velocity V in vertical direction Z for A, B and C methods of test chamber filling

Spadek ciśnienia powietrza przy przepływie w kierunkach: pionowym i poziomych

We wszystkich przeprowadzonych eksperymentach spadek ciśnienia powietrza w kierunku pionowym Z był wyższy niż w kierunkach poziomych X i Y. Zatem otrzymywano struktury porowatości złoża stawiające opór przepływu zgodny z doniesieniami literatury [5].

Na rysunku 5 przedstawiono zależność $\Delta p(V)$ dla złoża uformowanego metodą C i dwu kierunków przepływu: pionowego Z oraz poziomego Y. W całym zakresie prędkości krzywa $\Delta p(V)$ dla pionowego kierunku przebiega ponad krzywą dla kierunku poziomego. Przy prędkości $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ spadek ciśnienia powietrza w kierunku Y wynosi $128,2 \pm 7,2 \text{ Pa}$, a w kierunku Z $192,0 \pm 3,7 \text{ Pa}$, czyli jest 1,5 razy większy dla kierunku Z.

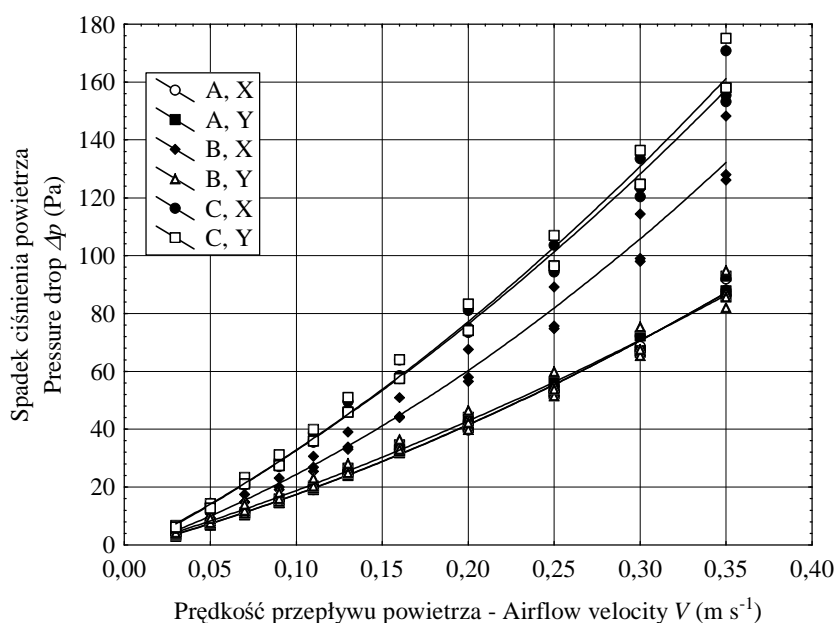


Rys. 5. Zależność spadku ciśnienia Δp od prędkości przepływu V powietrza w kierunku pionowym Z i poziomym Y w próbce uformowanej metodą C

Fig. 5. Relationships between pressure drop Δp and airflow velocity V in vertical direction Z and horizontal direction Y for samples formed using method C

Spadek ciśnienia przy przepływie powietrza w prostopadłych kierunkach poziomych

Na rysunku 6 przedstawiono zależności $\Delta p(V)$ wyznaczone w dwu poziomych kierunkach przepływu X i Y dla trzech metod napełniania, A, B i C komory pomiarowej. Złoże uformowane metodą A wywoływało najmniejszy spadek ciśnienia powietrza, a wyniki pomiarów Δp w kierunkach X i Y są bardzo bliskie.



Rys. 6. Zależność spadku ciśnienia Δp od prędkości przepływu V powietrza w kierunkach poziomych X i Y dla metod napełniania komory aparatu A, B i C

Fig. 6. Relationships between pressure drop Δp and airflow velocity V in horizontal directions X and Y for samples formed using methods A, B and C

Także w przypadku napełniania metodą C, która wytwarzała złoże o najwyższym oporze przepływu, przebiegi $\Delta p(V)$ były dla obu kierunków poziomych bardzo bliskie. Wyniki te wskazują, że metody napełniania A i C (napełnianie wzdłuż osi pionowej komory) wytwarzały złoże osiowo – symetryczne także w sensie rozkładu porowatości. W przypadku metody napełniania B opór przepływu złoża w kierunku X był w całym zakresie prędkości wyższy niż w kierunku Y (rys. 6.). W tym przypadku przy prędkości V równej $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wartość Δp w kierunku Y wynosi $69,5 \pm 5,1 \text{ Pa}$ zaś w kierunku X spadek ciśnienia jest równy $103,8 \pm 9,2 \text{ Pa}$.

Uzyskano więc 1,5 razy większy spadek ciśnienia dla przepływu powietrza w kierunku X. Metoda B wykorzystująca do napełniania zasobnik klinowy wytwarzała złożę niesymetryczne osiowo, kolejne warstwy ziaren poruszały się wzdłuż powierzchni naturalnego usypu równoległej do osi Y. W tym też kierunku opór przepływu był niższy.

Estymacja współczynników modelu Erguna

W tabeli 1 zamieszczono parametry równania (1) estymowane metodą regresji. Zasadniczy cel programu badań – rozpoznanie wpływu kierunku przepływu na opór przepływu skłonił autorów do zastosowania komory pomiarowej w kształcie sześciangu. W tym kształcie próbki wysokość złoża jest równa jego wymiarom poziomym, co uniemożliwia stabilizację przepływu. Dlatego nie podjęto próby estymowania parametrów modelu dla 1 m wysokości złoża, co nie pozwala na bezpośrednie porównanie wartości współczynników z doniesieniami literatury [5] jak i z wcześniejszymi wynikami autorów [8]. We wszystkich przypadkach współczynniki determinacji były nie niższe niż 0,992. Przyrost gęstości próbek w wyniku różnych sposobów ich formowania powodował zwiększenie parametrów modelu. Parametr a rósł 3,6 razy (od 145 do 521), a parametr b około 4 razy (od 219 do 868). Z wyjątkiem metody napełniania A i kierunku Z parametry modelu były wyższe dla pionowego kierunku przepływu powietrza. Wyraźne różnice parametrów w kierunkach poziomych otrzymano tylko w przypadku metody napełniania B, a więc tej, która wytwarzała złożę o strukturze niesymetrycznej.

Tabela 1. Parametry równania Erguna i współczynniki determinacji
Table 1. Parameters of Ergun equation and determination coefficients

Metody formowania próbek Methods of sample filling	Kierunek przepływu powietrza Direction of flow	Parametr – Parameter		R ²
		a	b	
A	Z	521	219	0,999
	X	145	298	0,996
	Y	146	296	0,995
B	Z	258	612	0,998
	X	201	562	0,997
	Y	151	224	0,997
C	Z	392	868	0,998
	X	279	490	0,993
	Y	275	529	0,992

WNIOSKI

1. Wyniki badań potwierdziły, że opór przepływu powietrza przez złożę pszenicy nie jest jednakowy w objętości złoża i zależy od sposobu jego formowania.

2. Zastosowane trzy metody napełniania sześcienniej komory aparatu umożliwiły wytworzenie złoża pszenicy o zróżnicowanych gęstościach: $768,6 \pm 1$, $779,8 \pm 0,6$, oraz $831,6 \pm 0,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Taki przyrost gęstości, przy prędkości przepływu powietrza $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, powodował 1,7-krotne zwiększenie spadku ciśnienia.

3. W złożu uformowanym osiowo - symetrycznie i zagęszczonym (metoda C) spadek ciśnienia w kierunku pionowym był 1,5-krotnie wyższy niż w kierunkach poziomych X i Y, dla których wartości Δp były w przybliżeniu równe.

4. Dla złoża uformowanego metodą B (napełnianie przez prostokątny otwór) wartości spadku ciśnienia w kierunkach X i Y różniły się. W kierunku X, równoległym do kierunku prędkości ziaren poruszających się po powierzchni naturalnego zsypu opór przepływu był wyższy niż w kierunku Y. Przy prędkości V równej $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wartość Δp w kierunku Y wynosiła $69,5 \pm 5,1 \text{ Pa}$ zaś w kierunku X spadek ciśnienia był równy $103,8 \pm 9,2 \text{ Pa}$, a więc 1,5 raza wyższy.

5. Wyniki badań potwierdzają istotny wpływ struktury upakowania złoża na opór przepływu powietrza. Ważna jest przy tym nie tylko porowatość, ale także struktura porowatości. Zagadnienie wymaga dalszych badań, przede wszystkim opracowania sposobu wizualizacji i opisu struktury porowatości

PIŚMIENNICTWO

1. ASAE D272.3 DEC01. Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products and perforated metal sheets. ASAE Standards 2003: 569-576.
2. **Brooker D.B., Baaker-Arkema F.W., C.W. Hall:** Drying and storage of grains and oilseeds. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
3. **Calderwood D.L.:** Resistance to airflow of rough brown and milled rice. Transactions of the ASAE 16(3), 525-527, 532, 1973.
4. **Ergun S.:** Fluid flow through paced columns. Chemical Engineering Progress, 48, 89-94, 1952.
5. **Giner S.A., Denisienia E.:** Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. Journal of Agricultural Engineering Research 63, 73-86, 1996.
6. **Hood T.J.A., Thorpe G.R.:** The effects of the anisotropic resistance to airflow on the design of aeration systems for bulk stored grains. Agricultural Engineering Australia, 21 (1 and 2), 18-23, 1992.
7. **Kumar A., Muir W.E.:** Airflow resistance of wheat and barley affected by airflow direction, filling method and dockage. Transactions of the ASAE 29(5), 1423-1426, 1986.
8. **Molenda M., Łukaszuk J., Horabik J.:** Airflow resistance of wheat as affected by grain density and moisture content. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 8(4), 2005.
9. **Navarro S., Noyes R.:** The mechanics and physics of modern grain aeration management. CRC Press, 2002.

10. **Neethirajan S., Karunakaran C., Jayas D.S., White N.D.G.:** X-ray computed tomography image analysis to explain the airflow resistance differences in grain bulks. *Biosystems Engineering*, 94(1), 545-555, 2006.
11. **Stephens L.E., Foster G.H.:** Grain bulk properties as affected by mechanical grain spreaders. *Transactions of the ASAE* 19(2), 354-358, 1976.
12. **Stephens L.E., Foster G.H.:** Bulk properties of wheat and grain sorghum as affected by a mechanical grain spreaders. *Transactions of the ASAE* 21(2), 1217-1221, 1978.

INFLUENCE OF METHOD OF DEPOSIT FORMATION ON AIRFLOW RESISTANCE IN WHEAT

Józef Łukaszuk, Marek Molenda, Józef Horabik

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: jlukas@demeter.ipan.lublin.pl

Abstract. Relationship between airflow velocity V and pressure drop Δp was examined in samples of wheat of moisture content of 10% wet basis. The sample was a cube of 0.35 m side and contained approximately 35 kg of grain. Three methods of filling the test chamber were used that generated samples of different density and packing structure. Characteristics of $\Delta p(V)$ were determined in three mutually perpendicular directions (Z – vertical, Y and X – horizontal) and for airflow velocities in the range from 0.03 to 0.35 m s⁻¹. Samples prepared using different methods varied in density from 768.6±1 to 831.6±0.4 kg m⁻³. Repeatability of density and airflow resistance were also dependent on the method of sample formation. Standard deviations of density were found in a range from 0.35 to 1 kg m⁻³. Samples of higher density posed larger resistance to airflow. The airflow resistance was found to be dependent on the flow direction. At the airflow velocity of 0.3 m s⁻¹ in axially filled unconsolidated or consolidated samples (methods A and C) pressure drop in vertical direction was 50 or 38% higher than those in horizontal directions X and Y. In asymmetrically filled sample (method B) airflow resistances in horizontal direction were different as well. In this case, at airflow velocity of 0.3 m s⁻¹, pressure drop in direction Z was 30% higher than in direction X and 93% higher than pressure drop in direction Y. Changes in the airflow resistance of such values may be expected in practice and should be considered in process design and in operation of equipment in technologies using airflow of gases through masses of granular materials, such as drying, aeration, cooling or fumigation.

Key words: grain, density, airflow resistance, airflow direction