

## ZALEŻNOŚĆ OPORU PRZEPŁYWU POWIETRZA OD GĘSTOŚCI ZŁOŻA NASION

*Józef Łukaszuk, Marek Molenda, Grzegorz Szwed*

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

**Streszczenie.** Wyznaczano opór przepływu powietrza przez złoża ziarna kukurydzy i pszenicy oraz nasion rzepaku. Badano wpływ gęstości materiału i wielkości nasion na opór przepływu w zakresie prędkości przepływu powietrza od 0,03 do 0,3 m·s<sup>-1</sup>. Wyniki pomiarów opisywano równaniem Erguna. Stwierdzono istotny wpływ wymiarów nasion i gęstości materiału na porowatość i opór przepływu powietrza. Wykazano, że równanie Erguna poprawnie opisuje zależność oporu przepływu od prędkości powietrza i może być wykorzystane do projektowania i analizy systemów wykorzystujących przepływ gazu przez złoża nasion.

**Słowa kluczowe:** nasiona, porowatość, opór przepływu powietrza

### WSTĘP

Jedną z metod umożliwiającą utrzymanie odpowiedniej wilgotności nasion przechowywanych w silosach jest napowietrzanie złoża. Metoda ta w ostatnim czasie staje się coraz bardziej popularna. Właściwe projektowanie i funkcjonowanie systemów napowietrzania wymaga znajomości charakterystyki zależności spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez złożę materiału od czynników o tym decydujących. Zagadnienie to interesuje zatem zarówno konstruktorów magazynów, jak i ich użytkowników. Wprowadzanie na rynek nasion nowych odmian roślin uprawnych powoduje, że problem wyznaczania oporu przepływu jest ciągle aktualny. Wspomniane wcześniej suszenie, a także schładzanie, fumigacja czy podawanie do złoża nasion substancji chemicznych, których nośnikiem jest gaz to procesy technologiczne, w których opór przepływu ma istotne znaczenie.

Opór przepływu wyraża się spadkiem ciśnienia gazu w kierunku przepływu. Zależy on głównie od prędkości gazu i porowatości złoża. O porowatości decydują przede wszystkim wymiary i kształt nasion oraz ilość zanieczyszczeń.

Porowatość może być różna w różnych miejscach złoza i może powodować różny opór przepływu.

Opory przepływu powietrza w roślinnych materiałach sypkich są przedmiotem badań od co najmniej 80 lat. Zajmowali się nimi: Stirniman i inni [14], Shedd [13], Barrowman i Boyce [5], Bakker-Arkema i inni [3], Agrawal i Chand [2], Abrams i Fish [1]. Szeroki przegląd opracowań dotyczących tej tematyki przedstawił Jayas [9]. Szwed [15] oraz Szwed i Łukaszuk [16] badali zmienność oporu przepływu powietrza przez próbki nasion rzepaku w zależności od czasu i warunków ich przechowywania.

W większości wcześniejszych badań zakładano, że opór przepływu nie zależy od kierunku ruchu powietrza w złożu materiału, a otrzymywane wyniki dotyczyły przeważnie przepływu pionowego. Lamond i Smith [11] zwrócili uwagę na zależność oporu przepływu od kierunku powietrza płynącego przez złoże materiału. Potwierdzone to zostało w badaniach Kumara i Muira dla ziół ziarna pszenicy i jęczmienia [10].

Do matematycznego opisu oporu przepływu opracowano wiele modeli umożliwiających oszacowanie zmian ciśnienia powietrza w zbiornikach przy założeniu izotropowych właściwości nasion [6,8,12]. Spośród wielu, równanie Erguna [7] opublikowane w 1952 roku jest wciąż chętnie stosowane i wydaje się, że ma szansę stać się szeroko uznanym standardem.

Celem prezentowanego programu badań było oszacowanie stopnia zmienności oporów przepływu złoza roślinnego materiału sypkiego w zależności od zmian jego gęstości, a także określenie przydatności zaprojektowanego i wykonanego w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie stanowiska do tego typu badań. Wyznaczanie oporu przepływu oparto na pomiarze spadku ciśnienia powietrza przetłaczanego przez wypełnioną badanym materiałem kolumnę.

#### METODA

Pomiary oporu przepływu wykonano dla oczyszczonych nasion rzepaku, pszenicy i kukurydzy o dwóch poziomach gęstości  $\rho_1$  i  $\rho_2$ . Nasiona tych roślin są w sposób wyraźny zróżnicowane pod względem kształtu wielkości i masy. Parametry badanych materiałów podano w tabeli 1.

Badania wykonano na aparacie, którego budowę przedstawia rysunek 1. Średnica kolumny pomiarowej wynosi 0,196 m. Pomiar spadku ciśnienia wykonywany był na odcinku kolumny o wysokości 0,95 m przy pomocy indukcyjnego czujnika różnicy ciśnień *Validyne* DP45, o maksymalnej wartości pomiarowej 2,25 kPa, współpracującego ze wzmacniaczem *Validyne* CD15. Porowatość nasion wyznaczano metodą piknometryczną zgodnie ze wzorem:

$$P = (\rho_n - \rho_u) \cdot \rho_n^{-1} \quad (1)$$

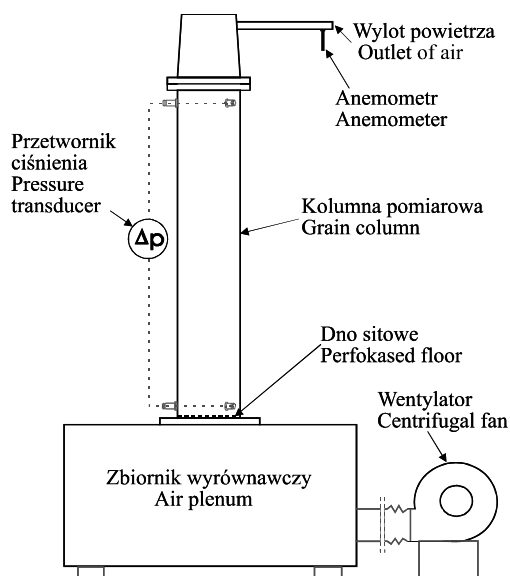
gdzie:  $\rho_n$  – gęstość właściwa nasion,  $\rho_u$  – gęstość usypna próbki.

Przepływ powietrza przez pionową kolumnę pomiarową wymuszano elektrycznym wentylatorem promieniowym o mocy 0,18 kW. Regulowana prędkość obrotowa wentylatora pozwalała uzyskać prędkość przepływu powietrza przez kolumnę w zakresie od 0,03 do 0,3 m·s<sup>-1</sup>. Prędkość przepływu mierzono anemometrem ANT 2000.

**Tabela 1.** Właściwości badanych materiałów

**Table 1.** Properties of tested materials

Material – Material	Wilgotność Moisture (%)	Gęstość Density (kg·m <sup>-3</sup> )	Porowatość Porosity	Średnica równoważna Equivalent diameter
Rzepak – Rapeseed, Lirajet	7	$\rho_1$ 630	0,40	1,86
		$\rho_2$ 670	0,36	
Pszenica – Wheat, Korweta	9	$\rho_1$ 730	0,47	4,10
		$\rho_2$ 782	0,44	
Kukurydza – Maize, Mieszko	10	$\rho_1$ 700	0,43	7,85
		$\rho_2$ 757	0,38	



**Rys. 1.** Aparat do badań oporów przepływu  
**Fig. 1.** Apparatus for measuring airflow resistance in seeds

Przyjęty zakres prędkości przepływu dawał podstawy do przypuszczenia, że w czasie pomiarów może wystąpić zarówno laminarny jak i turbulentny charakter przepływu powietrza przez złoża badanych materiałów. W wiązku z tym do aproksymacji wyników zastosowano równanie Erguna (2), które składa się z dwóch członów: liniowego – dla małej prędkości przepływu (przepływ laminarny) i nieliniowego – dla dużej prędkości przepływu (przepływ turbulentny):

$$\Delta p \cdot L^{-1} = A_3 V + B_3 V^2 \quad (2)$$

gdzie:  $L$  – odległość, na której mierzony był spadek ciśnienia  $\Delta p$ ,  $A_3$  i  $B_3$  – parametry,  $V$  – prędkość przepływu.

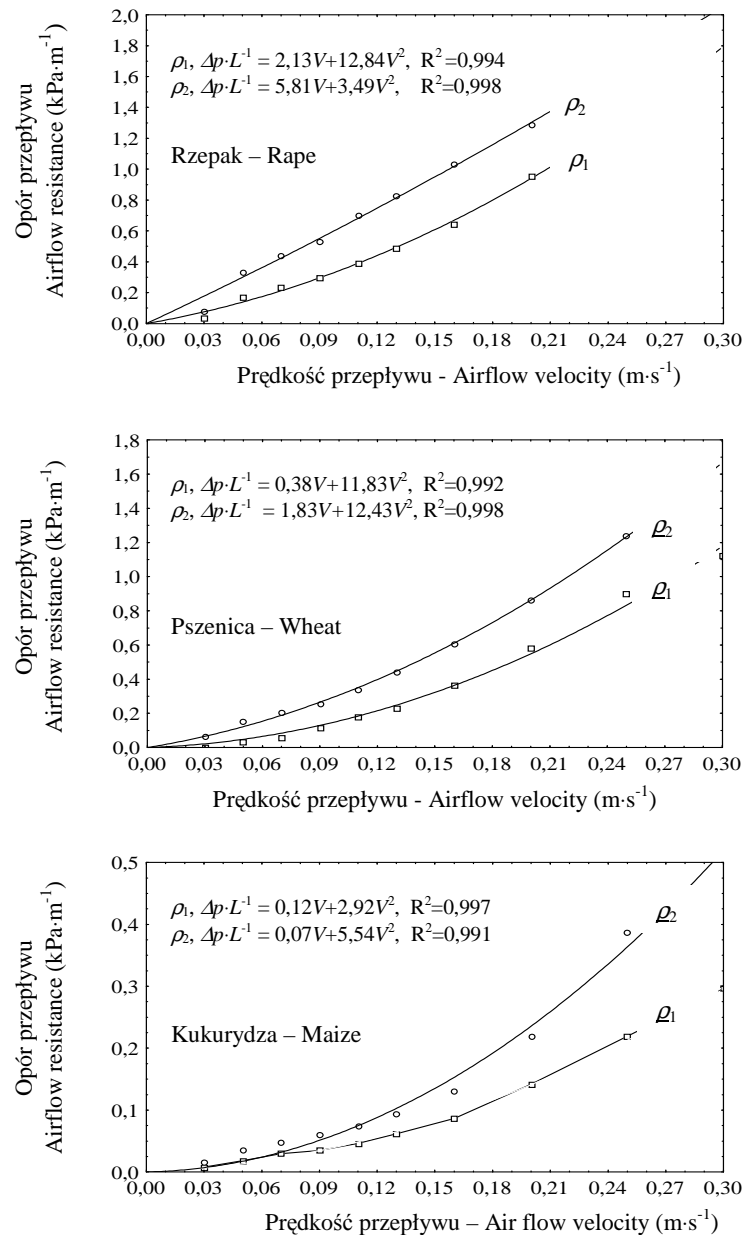
Kolumnę pomiarową napełniano nasionami przy pomocy stożkowego leja o wysokości 1 m i średnicach otworów 0,03 i 0,20 m – z najniższej możliwej wysokości. Kolumnę po napełnieniu poddawano wibracjom w celu zagęszczenia materiału. Masę kolumny z nasionami mierzono z dokładnością odczytu 0,050 kg. Pomiaru wykonywano w trzech powtórzeniach.

## WYNIKI

Na rysunku 2 przedstawiono wyznaczone wartości średnie oporu przepływu oraz aproksymację przebiegów równaniem Erguna. O słuszności przyjętego sposobu aproksymacji świadczą wysokie współczynniki determinacji  $R^2$ . Zgodnie z modelem Erguna [7], przyrost oporu przepływu badanych materiałów był nieliniowy i rósł ze wzrostem prędkości przepływu powietrza.

Wzrost wymiarów nasion badanych materiałów wywoływał spadek oporu przepływu. W przypadku luźnego złoża nasion rzepaku o gęstości  $630 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  i prędkości przepływu wynoszącej  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , opór przepływu wynosił  $0,95 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ , podczas gdy dla luźnego złoża ziarna pszenicy o gęstości  $730 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  i tej samej prędkości przepływu powietrza, opór przepływu wynosił  $0,58 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ , czyli był o 39% niższy. W przypadku ziarna kukurydzy, dla luźnego złoża o gęstości  $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  i tej samej prędkości przepływu powietrza, opór przepływu wynosił  $0,14 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$  i był o 85% niższy niż opór przepływu dla luźnego złoża nasion rzepaku, przy tej samej prędkości przepływu.

Przyrost gęstości ziół nasion powodował przyrost oporu przepływu we wszystkich badanych materiałach. W przypadku nasion rzepaku, dla prędkości przepływu  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , opór przepływu złoża luźnego o gęstości  $630 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  wynosił  $0,95 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ , podczas gdy dla złoża zagęszczonego o gęstości  $670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  wynosił  $1,29 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ , tzn. był o 36% wyższy. Podobne tendencje występowały w przypadku ziół ziarna pszenicy i kukurydzy. W przypadku ziarna pszenicy, dla prędkości  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,



**Rys. 2.** Zależność oporu przepływu  $\Delta P \cdot L^{-1}$  od prędkości przepływu  $V$  w złożu nasion: rzepaku, pszenicy i kukurydzy o dwóch poziomach gęstości:  $\rho_1$  i  $\rho_2$  (Tab. 1)

**Fig. 2.** Airflow resistance  $\Delta P \cdot L^{-1}$  versus velocity  $V$  for rapeseeds, wheat and corn at two levels of bulk density:  $\rho_1$  and  $\rho_2$  (Tab. 1)

przyrost gęstości złoża od  $730 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  do  $782 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  powodował przyrost oporu przepływu od  $0,58 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$  do  $0,87 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ , czyli o 50%. W przypadku ziarna kukurydzy, przy tej samej prędkości przepływu, przyrost gęstości od  $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  do  $757 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  powodował przyrost oporu przepływu od  $0,14 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$  do  $0,22 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ , tj. o 57%.

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że istnieje bardzo silna zależność oporu przepływu od średnicy równoważnej nasion i gęstości badanych ośrodków. Ze wzrostem wymiarów nasion opór przepływu maleje. Przyrost gęstości złoża zmniejsza porowatość materiału i powoduje wzrost oporu przepływu.

Analiza przebiegów zależności  $\Delta p(V)$  przedstawionych na rysunku 2 pozwala również stwierdzić, że największy wpływ zagęszczania na nieliniowość przebiegów wystąpił w przypadku nasion rzepaku, dla których współczynnik  $B_3$ , przy zmiennej  $V$  (prędkość przepływu) (równanie 2), był dla materiału luźnego o gęstości  $630 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  około czterokrotnie większy niż dla materiału zagęszczonego o gęstości  $670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , a przebieg zbliżony był do liniowego. Zagęszczanie ziarna pszenicy i kukurydzy również powodowało wzrost współczynnika  $B_3$  i nieliniowości przebiegów. Świadczy to o wyraźnym wpływie kształtu i średnicy równoważnej nasion na wzrost wartości współczynnika  $B_3$  i nieliniowości przebiegów: opór przepływu – prędkość przepływu.

#### WNIOSKI

1. Zagęszczanie złoża materiału wywołuje przyrost oporu przepływu zależny od rodzaju i kształtu nasion. Wzrost średnicy równoważnej nasion zmniejsza opór przepływu.

2. Stwierdzono, że istnieje wyraźny wpływ porowatości materiału na parametry równania Erguna. W związku z tym równanie to może być zastosowane do projektowania systemów aeracji przechowywanych materiałów, a także do sterowania tymi systemami z uwzględnieniem zmienności oporu przepływu w objętości złoża.

3. Testowany zestaw pomiarowy pozwala na efektywne wyznaczenie zależności oporu przepływu powietrza przez złoże nasion od prędkości przepływu, w zakresie prędkości od  $0,03$  do  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

#### PIŚMIENNICTWO

1. **Abrams C.F., Fish J.D.:** Resistance of sweet potatoes to airflow. ASAE Paper no. 78-4523, St. Joseph, Mich, 1978.
2. **Agrawal K.K., Chand P.:** Pressure drop across fixed beds of rough rice. Trans. ASAE, 17(3), 560-563, 1974.
3. **Bakker-Arkema F.W., Patter-Son R.J., Bickert W.G.:** Static pressure-airflow relationships in packed beds of granular biological materials such as cherry pits. Trans. ASAE, 12(1), 134-136, 140, 1969.
4. **Bern C.J., Charity L.F.:** Airflow resistance characteristics of corn as influenced by bulk density. ASAE Paper no. 75-3510, St. Joseph, Mich, 1975.

5. **Borrowman R., Boyce D.S.:** Air distribution from lateral ducts in barley. *J. Agric. Eng., Res.* 11(4), 243-247, 1966.
6. **Brooker D.B.:** Computing air pressure and velocity distribution when air flows through a porous medium and nonlinear velocity pressure relationships exist. *Trans. ASAE*, 12(1), 118-120, 1969.
7. **Ergun S.:** Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48, 89-94, 1952.
8. **Hague E., Chung D.S., Foster G.H.:** Pressure and velocity field in airflow through packed bed of corn mixed with fines under non – Darcy flow conditions. *Trans. ASAE*, 24(6), 1595-1604, 1981.
9. **Jayas D. S.:** Resistance of bulk canola oilseed to airflow. Unpublished Ph. D. thesis. Department of Agricultural Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Sask, 1987.
10. **Kumar A., Muir W.E.:** Airflow resistance of wheat and barley affected by airflow direction, filling method and dockage. *Trans. ASAE*, 29(5), 1423-1426, 1986.
11. **Lamond W.J., Smith E.A.:** Modeling low temperature drying of grain in anisotropic beds. Third International Drying Symposium, Birmingham, U.K., 1982.
12. **Marchant J.A.:** The prediction of air flows in crop drying systems, by the finite element method. *J. Agric. Eng., res* 21, 417-429, 1976.
13. **Sheed C.H.:** Some new data on resistance of grains for airflow. *Agric. Eng.*, 32 (9), 493-495-520, 1951.
14. **Stirniman E.J., Bodnar G.P., Bates E.N.:** Test on resistance to passage of air through rough rice in a deep bed. *Agric. Eng.*, 12, 145-148, 1931.
15. **Szwed G.:** Wpływ czasu przechowywania na zmianę oporu przepływu powietrza przez warstwę nasion rzepaku. *Acta Agrophysica*, 37, 225-235, 2000.
16. **Szwed G., Łukaszuk J.:** Ocena oporu przepływu powietrza przez warstwę nasion rzepaku. *Acta Agrophysica*, 2(3), 645-650, 2003.

## INFLUENCE OF BULK DENSITY OF SEEDS ON AIRFLOW RESISTANCE

*Józef Łukaszuk, Marek Molenda, Grzegorz Szwed*

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

**Abstract.** Airflow resistance through beddings of maize, wheat and rapeseeds was determined. Influence of bulk density and seed size on the airflow resistance in a range of airflow velocity from 0.03 up to 0.3 m s<sup>-1</sup> was examined. Ergun's equation was applied to predict airflow resistance. Strong influence of material bulk density and seed size on porosity and airflow resistance was found. Ergun's equation was shown to describe adequately the relationship under examination, and as such it could be utilized for the design and analysis of grain aeration systems.

**Keywords:** granular material, porosity, airflow resistance