

OPORY PRZEPIYU POWIETRZA PRZEZ ZŁOŻE NASION MARCHWI W SUSZARCE WIBRACYJNEJ

Joanna Kaniewska, Damian Żórawski, Marek Domoradzki
Zakład Technologii Żywności, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Streszczenie. Praca dotyczy badań oporów powietrza przepływającego przez warstwę nasion marchwi w suszarce wibracyjnej. Badania obejmowały spadek ciśnienia powietrza wzdłuż warstwy nasion w zależności od prędkości przepływu powietrza u , dla stałej amplitudy drgań i dla różnych wysokości złoża. Jednostkowy spadek ciśnienia złoża wibrowanego porównano ze złożem niepoddanym wibracjom. Wartości oporów jednostkowych powietrza wzdłuż warstwy nasion zwiększały się wraz ze wzrostem prędkości przepływu powietrza zgodnie z równaniem Erguna dla: złoża stacjonarnego: $\frac{dP_2}{H_1} = 40530 \cdot U^2 + 5974 \cdot U$ $R^2 = 0,96$ dla

$0,075 < U < 0,250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla złoża wibrowanego $\frac{dP_2}{H_1} = 40530 \cdot U^2 + 5974 \cdot U$ $R^2 = 0,95$ dla

$0,075 < U < 0,250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ruch drgający warstwy nasion rozluźnia złożo i zmienia jego porowatość oraz powoduje ruch warstwy nasion na sicie, co zapobiega pojawianiu się kanałów dla przepływającego powietrza i gwarantuje równomierne wysuszenie.

Słowa kluczowe: suszarka wibracyjna, opory przepływu powietrza, jednostkowy spadek ciśnienia, suszenie nasion

Wykaz oznaczeń:

$\left(\frac{\Delta P_2}{H} \right)$ – opór jednostkowy warstwy nasion, ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)

D – średnica aparatu, (m)

d – średnica rurociągu, (m)

dP_1 – różnica ciśnień statycznego i dynamicznego w rurce Pitota, (Pa)

dP_2 – spadek ciśnienia na warstwie nasion, (Pa)

P_0 – ciśnienie powietrza za pompą, (Pa)

d_z – średnica zastępcza cząstki, (m)

F	– pole powierzchni komory, (m ²)
H	– wysokość warstwy nasion, (m)
K	– współczynnik rurki Pitota, $K=1,0015$ (-)
L	– licznosc nasion, (szt. g ⁻¹)
m	– masa nasion, (kg)
O	– obwód sita, (m)
T	– temperatura, (°C)
t_{obieg}	– czas obiegu materiału po obwodzie suszarki, (s)
U	– prędkość przepływu powietrza liczona na pusty poprzeczny przekrój aparatu, (m·s ⁻¹)
u	– prędkość powietrza, (m·s ⁻¹)
V	– objętość cylindra, (cm ³)
V_{wody}	– objętość wody, (cm ³)
V_s	– objętość nasion, (cm ³)
w	– prędkość obwodowa warstwy nasion, (m·s ⁻¹)
ε	– porowatość złoża, (-)
η	– lepkość dynamiczna, (Pa·s)
ρ_u	– gęstość usypowa nasion, (kg·m ⁻³)
ρ	– gęstość właściwa nasion, (kg·m ⁻³)
ρ_0	– gęstość gazu, (kg·m ⁻³)
x_i	– udział masowy frakcji i , (-)

Wprowadzenie

W celu uzyskania obfitych i zdrowych plonów roślin, konieczne są czyste mikrobiologicznie nasiona, charakteryzujące się dobrą zdolnością kiełkowania (Kaniewska i Domoradzki, 2010). Nasiona wilgotne są bezpośrednio narażone na działanie pleśni oraz innych patogenów (Kaleta i Górnicki, 2008). Jakość i trwałość nasion zależy od ich wilgotności. Suszenie to jeden z podstawowych procesów obróbki technologicznej, mający wpływ na jakość materiału siewnego. W przemyśle nasiennym bardzo często stosuje się zabiegi przedsiewne, polegające na odkażaniu materiału siewnego w roztworach wodnych środków chemicznych, które powodują konieczność szybkiego wysuszenia nasion. (Weiner i Domoradzka, 2005; Krawczyk i in., 2009; Poćwiardowski i in., 2010). Tradycyjne metody suszenia w złożu stacjonarnym nie gwarantują równomiernego wysuszenia nasion. W złożach stacjonarnych (nie mieszanych) podczas suszenia nasion mokrych tworzą się kanały dla przepływającego powietrza suszącego, chaotycznie rozmieszczone w całej warstwie nasion (Sadeghi i Khoshataghaza, 2012). W trakcie procesu suszenia mokre nasiona formują się w większe aglomeraty, co utrudnia prowadzenie procesu i zmusza do wprowadzenia dodatkowych operacji, takich jak mieszanie złoża, a nawet opróżnienie suszarki, rozdzielenie aglomeratów na sitach i ponowne załadowanie materiału do komory suszarniczej.

Wibracja warstwy nasion, a także zapewnienie jej mieszania w trakcie suszenia pozwala uzyskać równomierny przepływ powietrza przez złożę, a tym samym – równomierne suszenie ziarna. Dla szybkiego wysuszenia mokrych nasion, po operacjach wodnych, należy przetłoczyć przez złożę dużą ilość powietrza. W tym celu dla zaprojektowania su-

szarki i doboru wentylatorów konieczne jest poznanie oporów stawianych przez warstwę nasion zarówno w stanie stacjonarnego suszenia, jak i z zastosowaniem wibracji. (Kaniowska i Domoradzki, 2010).

Opór jednostkowy przepływu powietrza przez warstwę $\left(\frac{\Delta P_2}{H}\right)$ najczęściej określa się na podstawie wzoru (1) (Ergun, 1952; Serwiński, 1971; Warpechowski i in., 2002; Łukaszuk i in., 2004):

$$\left(\frac{\Delta P_2}{H}\right) = 1,75 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_0}{d_z} \cdot U^2 + 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\eta \cdot U}{d_z^2} \quad (1)$$

Do dalszych obliczeń wzór (1) uproszczono do postaci:

$$\left(\frac{\Delta P_2}{H}\right) = A \cdot U^2 + B \cdot U \quad (2)$$

Cel pracy

Celem pracy było określenie oporów przepływu powietrza przez warstwę nasion w suszarce w zależności od prędkości przepływu powietrza dla złoża stacjonarnego i wibrującego za pomocą równania Erguna. Zbadano także zależność spadku ciśnienia w warstwie od jej wysokości.

Materialy i metody

Do badań wykorzystano nasiona marchwi Perfekcja o średnicy od 1,2 do 1,6 mm. Wilgotność nasion wyznaczono metodą suszarkową wg normy PN-R-65950. Gęstość usypową ρ_u nasion wyznaczono metodą ważenia w nasion luźno usypanych w cylindrze miarowym. Pustą przestrzeń w nasionach (ε – porowatość) zmierzono przez zalanie wodą w cylindrze miarowym nasion nasyconych wcześniej ciekłą parafiną.

$$\varepsilon = \frac{V - V_s}{V} = \frac{V_{wody}}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} \quad (3)$$

Gęstość właściwą obliczono ze wzoru:

$$\rho = \frac{m}{V_s} = \frac{m}{V - V_{wody}} \quad (4)$$

Średnicę zastępczą nasion obliczano na podstawie analizy sitowej z zależności de Brouckera:

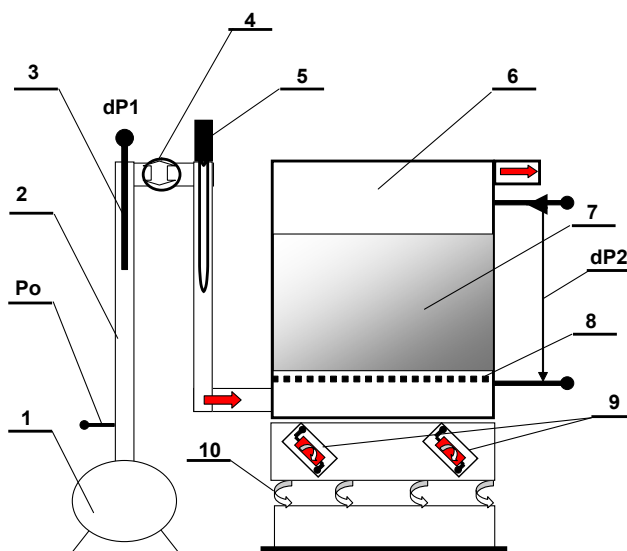
$$d_z = \sum_{i=1}^n x_i \cdot d_{zi} \quad (5)$$

Tabela 1
Charakterystyka badanego materiału
 Table 1
Characteristics of the investigated material

Gęstość usypowa ρ_u ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Gęstość właściwa ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Porowatość (-)	Wilgotność W (%)	Liczność L (szt g^{-1})	Średnica zastępcza d_z (mm)
495	1010	0,51	8,5	800	1,46

Aparatura

Badania spadku ciśnienia w złożu wykonano na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 1. Wentylator (1) tłoczył powietrze przez rurociąg (2), doprowadzając je do komory suszarniczej (6). W rurociągu doprowadzającym powietrze umieszczona była rurka Pitota (3) z firmy KIMO do pomiaru prędkości przepływającego powietrza.



Rysunek 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – wentylator, 2 – rurociąg doprowadzający powietrze, 3 – rurka Pitota do pomiaru prędkości przepływu, 4 – zawór, 5 – grzałka, 6 – komora suszarki, 7 – złożo, 8 – sito, 9 – wibratory, 10 – zawieszenie sprężynowe, P_0 – ciśnienie za wentylatorem, dP_1 – różnica ciśnień na rurce Pitota, dP_2 – różnica ciśnień na warstwie nasion

Figure 1. Diagram of the test rigs: 1 – fan, 2 – air supplying pipeline, 3 – pilot tube for flow velocity measurement, 4 – valve, 5 – heater, 6 – chamber of a drier, 7 – bed, 8 – sieve, 9 – vibrators, 10 – spring suspension, P_0 – pressure behind a fan, dP_1 – difference of pressures on the pilot tube, dP_2 – difference of pressures on the layer of seeds

Czujnik ciśnieniowy rurki Pitota, mierzący przepływ powietrza, znajdował się w odległości 500 mm (10 średnic) za wentylatorem, a za czujnikiem ciśnieniowym w odległości 500 mm (10 średnic) znajdował się trójnik (rys. 1). Spełniono zatem wymagania dla precyzyjnego pomiaru prędkości powietrza.

Między rurką Pitota (3) a grzałką (5) znajdował się zawór (4) i manometr wodny P_0 , służący do wstępnej regulacji natężenia przepływu powietrza w oparciu o charakterystykę wentylatora.

Komora suszarnicza miała średnicę wewnętrzną $D=0,6$ m i składała się z sześciu elementów o wysokości 0,1 m połączonych zaciskami. Na dolnym pokładzie zamocowano układ wibracyjny z dwoma wibratorami, który spoczywał na zawieszeniu sprężystym składającym się z 12 sprężyn. Średnica rurociągu doprowadzającego powietrze (2) wynosiła $d=0,053$ m. Nasiona marchwi (7) umieszczono na sicie (8) o średnicy $D=0,6$ m z otworami okrągłymi o średnicy 1 mm, umocowanym na dnie cylindrycznej komory. Powietrze było tłoczone od dołu do góry komory z prędkością taką, by nie spowodować wywiewania nasion z komory.

Pod sitem i w górnej części komory suszarniczej zainstalowano króćce do pomiarów spadku ciśnienia powietrza przy pomocy manometrów wodnych dP_2 . Ciśnienia mierzono z dokładnością do 1 mm słupa H_2O .

Metodyka

Położenie wibratorów do napędu suszarki ustawiono pod kątem 45° w stosunku do pionu i ustawiono stałą siłę wywołującą vibracje równą 3654 N. Masa pustej suszarki wibracyjnej o powierzchni $F=0,2826$ m² i obwodzie zewnętrznym $O=1,884$ m wynosiła 4,8 kg.

Ciśnienie powietrza za wentylatorem P_0 zmieniano w zakresie od 1200 do 1800 mm H_2O . Prędkość przepływu powietrza w rurociągu, w którym zamocowano rurkę Pitota, obliczano z zależności podanej przez producenta aparatury:

$$u = K \cdot \sqrt{574,2 \cdot T + 156842} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_d}{P_0}} \quad (6)$$

Prędkość przepływu powietrza przeliczano na pusty przekrój poprzeczny aparatu – U , korzystając z równania ciągłości strugi. Tłoczone powietrze miało temperaturę ok. $30^\circ C$.

$$u \cdot d^2 = U \cdot D^2, \text{ stąd } U = u \cdot \frac{d^2}{D^2} \quad (7)$$

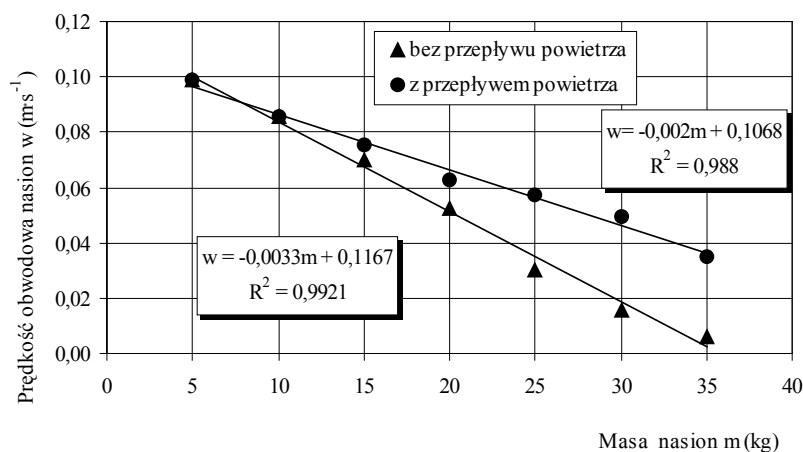
Wykonano pomiary oporu przepływu powietrza przez sito, zmieniając prędkość przepływu powietrza. Czujniki ciśnienia znajdowały się w odległości 10 mm od ścianki bocznej komory pod sitem i w górnej części komory suszarniczej. Obliczano różnicę ciśnień dP_2 uwzględniając opór sita. Pomiary spadku ciśnienia powietrza wykonano dla grubości warstwy $H = 0,08; 0,16$ i $0,24$ m. Badania prowadzono dla złoża stacjonarnego i dla złoża poddanego wibracji w układzie współbieżnych drgań wibratorów. Każdorazowo pomiary powtarzano trzykrotnie.

Podczas pomiarów oporów przepływu powietrza w złożu niestacjonarnym mierzono dodatkowo prędkość nasion na sicie, tuż przy ścianie komory, za pomocą znacznika obiegającego komorę wraz z nasionami (8). Badania miały na celu określenie ruchu obwodowego materiału w komorze podczas suszenia.

$$w = \frac{O}{t_{\text{obiegu}}} \quad (8)$$

Omówienie wyników

Dla złoża wibrowanego, przez który przepływało lub nie przepływało powietrze, zmierzono czas jednego obiegu dookoła zbiornika przy pomocy znacznika położonego na powierzchni nasion (rys. 2). Wysokość złoża w suszarce ulegała ciągłym wahaniom, w zależności od wibracji i przepływu powietrza. Uniknięto tych niedokładności, stosując masę nasion na sicie.

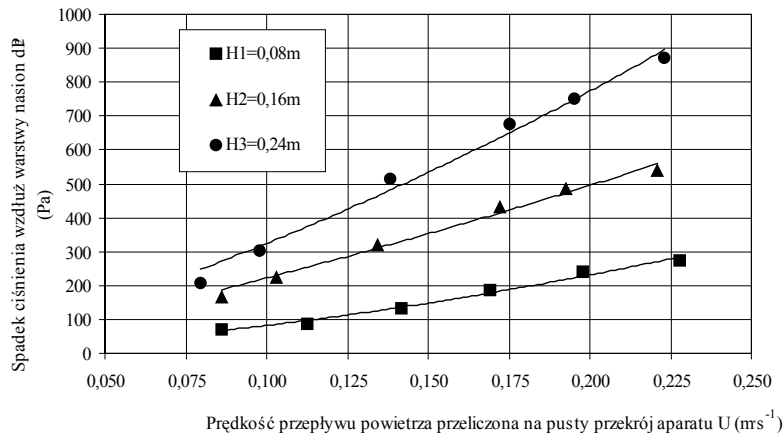


Rysunek 2. Zależność prędkości nasion na wibrującym sicie od masy nasion i wariantu przepływu powietrza

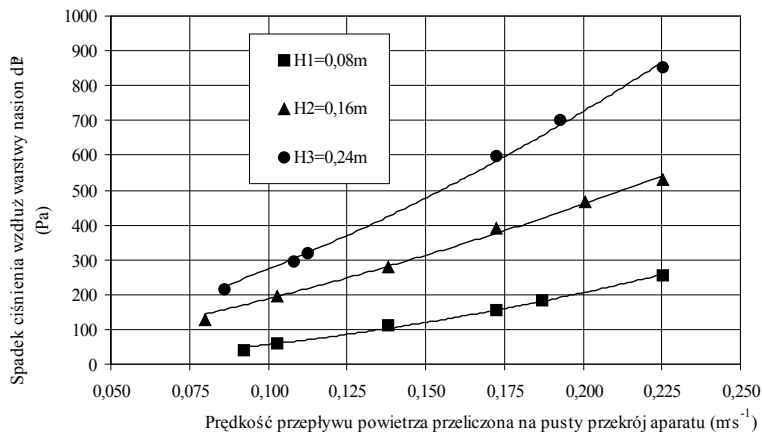
Figure 2. Dependency of the velocity of seeds on the vibrating sieve on the weight of seeds and air flow option

Prędkość obwodowa maleje wraz ze wzrostem masy nasion na sicie. Zależność ta występuje w złożu niestacjonarnym z przepływem, jak i bez przepływu powietrza. Obserwowany spadek prędkości jest wyraźnie większy dla złoża bez przepływającego powietrza i fakt ten wynika z różnic siły tarcia podczas nacisku materiału na sito. Podczas przepływu powietrza przez złożo następuje dodatkowo rozluźnienie suszonego materiału. Siły wibracji wpływają na wzrost porowatości i obniżenie gęstości usypowej nasion podczas suszenia.

Dla zmiennych wysokości złoża wyznaczono spadek ciśnienia wzdłuż warstwy nasion w zależności od prędkości przepływającego powietrza. Opory przepływu badano dla złoża stacjonarnego (rys. 3) oraz złoża niestacjonarnego (rys. 4).



Rysunek 3. Zależność spadku ciśnienia dP_2 wzdłuż warstwy nasion marchwi dla różnej wysokości złoża w zależności od prędkości przepływu powietrza dla złoża stacjonarnego
 Figure 3. Dependency of the pressure decrease dP_2 along a layer of carrot seeds for varied height of the bed in relation to the air flow velocity for the stationary bed

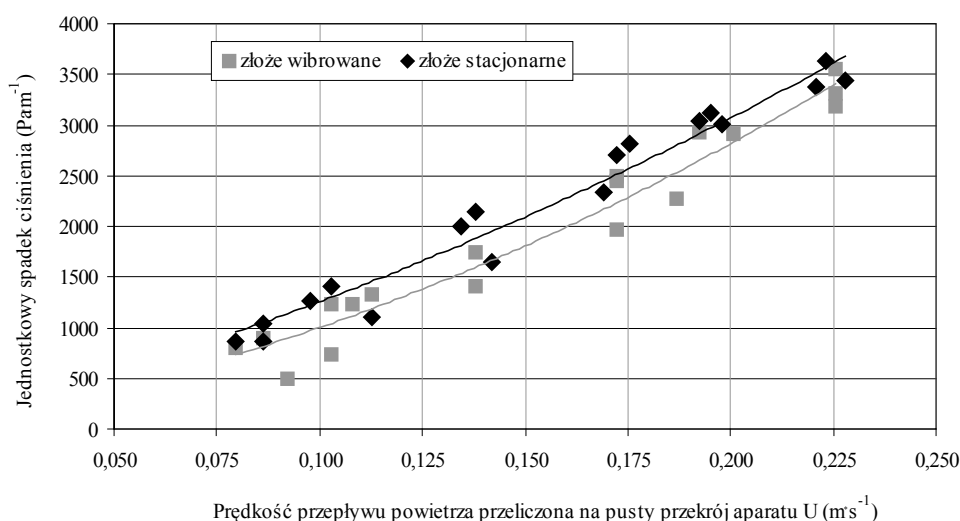


Rysunek 4. Zależność spadku ciśnienia dP_2 wzdłuż warstwy nasion marchwi o różnej wysokości złoża w zależności od prędkości przepływu powietrza dla złoża wzbudzanego
 Figure 4. Dependency of the pressure decrease dP_2 along a layer of carrot seeds of a varied height of the bed in relation to air flow velocity for the exciting bed

Spadek ciśnienia na warstwie nasion rośnie wraz ze wzrostem prędkości przepływającego powietrza, przy czym dla złoża stacjonarnego był odpowiednio większy niż dla złoża wibrowanego. Spadek ciśnienia rośnie wraz z wysokością złoża.

Różnice spadku ciśnienia powietrza na warstwie nasion dla złoża wibrowanego wynikają z rozluźnienia złoża pod wpływem wibracji. Złoże wibrowane wykazuje nieznacznie niższy opór dla przepływu powietrza niż stacjonarne.

Dla różnych wysokości złoża nasion marchwi H_i wyznaczono opór jednostkowy warstwy nasion w zależności od prędkości przepływu powietrza liczonej na przekrój poprzeczny pustego aparatu.



Rysunek 5. Porównanie jednostkowego spadku ciśnienia wzdłuż warstwy nasion marchwi w zależności od prędkości przepływu powietrza dla złoża stacjonarnego i wibracyjnego
 Figure 5. Comparison of a unit decrease of pressure along a layer of carrot seeds in relation to air flow velocity for the stationary and vibrating bed

Jednostkowy opór powietrza w warstwie jest niższy dla złoża wzbudzanego elektrowibratorami. Do opisu jednostkowego oporu przepływu dla złoża stacjonarnego i wibracyjnego zastosowano równanie Erguna (1952), uzyskując zależności:

– złoże stacjonarne

$$\frac{dP_2}{H_i} = 27774 \cdot U^2 + 9797 \cdot U \quad R^2 = 0,96 \quad \text{dla } 0,075 < U < 0,250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9)$$

– złoże wibrowane

$$\frac{dP_2}{H_i} = 40530 \cdot U^2 + 5974 \cdot U \quad R^2 = 0,95 \quad \text{dla } 0,075 < U < 0,250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (10)$$

Na podstawie analizy statystycznej można stwierdzić, że równanie Erguna (9) i (10) dobrze opisuje jednostkowy spadek ciśnienia na warstwie nasion w zależności od prędkości przepływu powietrza liczonej na pusty aparat – U . Współczynnik determinacji jest bliski jedności, co wskazuje na bardzo dobre dopasowanie równania do danych doświadczalnych.

Wnioski

1. Jednostkowy spadek ciśnienia powietrza przepływającego przez złożę suszonego materiału dobrze opisują równania Erguna.
2. Opór jednostkowy złoża wibrowanego w porównaniu z oporem jednostkowym, stawianym przez złożę stacjonarne, jest mniejszy, co wynika z rozluźnienia złoża przez wibracje.
3. Prędkość poruszania się nasion po sicie jest większa w przypadku złoża wibrowanego z przepływającym od dołu powietrzem. Ruch drgający warstwy nasion rozluźnia złożę, a tym samym zmniejsza tarcie hamujące ruch materiału po sicie.

Literatura

- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48, 89-94.
- Frączek, J.; Wróbel, M. (2006). Metodyczne aspekty oceny kształtu nasion. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 155-163.
- Kaleta, A.; Górnicki, K. (2008). Bezpieczne przechowywanie ziarna- studium zagadnienia. *Inżynieria Rolnicza*, 1(99), 137-143.
- Kaniewska, J.; Domoradzki, M. (2010). Opory przepływu powietrza przez suszarkę stożkową wypełnioną nasionami fasoli. *Inżynieria Rolnicza*, 5(123), 71-79.
- Krawczyk, K.; Maćkowiak-Sochacka, A.; Zwolińska, A. (2009). Wpływ powszechnie stosowanych metod dezynfekcji na kiełkowanie nasion pomidora. *Progress in Plant Protection*, 49(3), 1291-1297.
- Łukaszuk, J., Molenda, M.; Szwed, G. (2004). Zależność oporu przepływu powietrza od gęstości złoża nasion. *Acta Agrophysica*, 4(1), 77-83.
- Poćwiardowski, W.; Kaniewska, J.; Domoradzki, M.; Korpala, W. (2010). Odkażanie nasion marchwi podchlorynem sodowym. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 546, 279-285.
- Sadeghi, M.; Khoshtaghaza, M. H. (2012). Vibration Effect on Particle Bed Aerodynamic Behavior and Thermal Performance of Black Tea in Fluidized Bed Dryers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, Vol. 14, 781-788.
- Serwiński, M. (1971). *Zasady inżynierii procesowej. Operacje jednostkowe*. Warszawa, WNT, 108-114.
- Warpechowski, K.; Jopkiewicz, A. (2002). Wyznaczanie współczynnika oporu przepływu w złożu koksu. *Archiwum Odlewnictwa*, Rocznik 2, 5, 124-131.
- Weiner, W.; Domoradzka, O. (2005). Badania odkażania nasion papryki. *Inżynieria Rolnicza*, 9(69), 361-365.
- PN-R-65950:1994. *Material siewny. Metody badania nasion*.

RESISTANCE OF AIR FLOW THROUGH THE BED OF CARROT SEEDS IN THE VIBRATING DRIER

Abstract: The research paper concerns the resistance of air flow through the layer of carrot seeds in a bed dryer. The study covered the air pressure drop along the layer of carrot seeds depending on the speed of the air flow u in the dryer for constant vibration amplitude and different heights of the bed. The results of the unit pressure gradient for the bed induced were compared with the stationary bed (not subject to vibrations). The air flow resistance values along the layer of seeds increased with the increase of the air flow speed according to Ergun equation: stationary bed:

$$\frac{dP_2}{H_i} = 40530 \cdot U^2 + 5974 \cdot U \quad R^2=0.96 \quad \text{for} \quad 0.075 < U < 0.250 \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{induced} \quad \text{bed}$$

$$\frac{dP_2}{H_i} = 40530 \cdot U^2 + 5974 \cdot U \quad R^2=0.95 \quad \text{for} \quad 0.075 < U < 0.250 \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad \text{Oscillations of the seed layer loosens}$$

the bed and changes porosity of the bed, thus preventing the appearance of the air flow channels, resulting in even drying of the seeds in the layer of the bed.

Key words: vibrating dryer, air flow resistance, unit drop pressure, seed drying

Adres do korespondencji:

Joanna Kaniewska; e-mail: joanna.kaniewska@utp.edu.pl
Katedra Aparatury i Technologii Żywności
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
ul. Seminaryjna 3
85-326 Bydgoszcz