

BADANIE OPORU PRZEPŁYWU POWIETRZA PRZEZ WARSTWĘ NASION BURAKA

Joanna Kaniewska, Marek Domoradzki, Lidia Wardecka

Zakład Technologii Żywności
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy
ul. Seminaryjna 3, 85-326 Bydgoszcz
e-mail: joanna.kaniewska@utp.edu.pl

Streszczenie. W pracy podjęto badania oporów przepływu powietrza przez warstwę nasion buraka. Opory przepływu powietrza przez porowatą warstwę nasion, dla szerokiego zakresu wartości liczby Reynoldsa, opisuje zmodyfikowane równanie Leva. Wyznaczenie współczynnika oporów w zależności od liczby Reynoldsa pozwoli na zaprojektowanie wysokości warstwy w suszarce dla danego wentylatora lub dobrania wentylatora dla założonej wysokości złoża zapewniającego optymalny czas suszenia. Wyznaczono właściwości fizyczne nasion buraka ćwikłowego. Ustalono spadki ciśnienia na poszczególnych wysokościach złoża, co posłużyło do wyznaczenia jednostkowego spadku ciśnienia. Zależność jednostkowego spadku ciśnienia i prędkości przepływu powietrza przedstawiono równaniem Erguna. Do opisu zależności między współczynnikiem oporów a liczbą Reynoldsa obliczono stałą $K_2 = 15,03$, charakteryzującą nasiona buraka.

Słowa kluczowe: opory przepływu przez materiał ziarnisty, suszenie nasion

WYKAZ OZNACZEŃ

- a_i – średnica otworu sita (m),
- $d_{zi} = \sqrt{a_i \cdot a_{i-1}}$ – średnia geometryczna średnica frakcji nasion (m),
- d – średnica wewnętrzna rurociągu (m),
- D – średnica wewnętrzna suszarki (m),
- dP_2 – spadek ciśnienia powietrza na warstwie nasion (Pa),
- F – pole powierzchni przekroju aparatu suszącego (m²),
- f – pole powierzchni przepływu powietrza w rurociągu (m²),
- g – przyspieszenie ziemskie (9,81 m·s⁻²),
- L – grubość warstwy nasion w suszarce (m),
- m_i – masa nasion na i-tym sicie (kg),

n – wykładnik potęgi zależny od liczby Reynoldsa,
 Re – liczba Reynoldsa,
 u – prędkość powietrza w przeliczeniu na pusty przekrój aparatu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 U – prędkość powietrza w rurociągu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 x_i – udział masowy frakcji i ,
 ε – porowatość złoża nasion,
 λ – współczynnik oporów przepływu przez warstwę nasion,
 ν – kinematyczna lepkość powietrza ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
 ρ – gęstość właściwa ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
 ρ_u – gęstość usypowa ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
 φ – czynnik kształtu,
 a, b, c – wymiary nasion, kolejno grubość, szerokość i długość (m),

$$q = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \text{ – udział frakcji w zbiorze (\%)}$$

WSTĘP

Uprawa warzyw jest obecnie wysoko wyspecjalizowanym procesem, co w rezultacie prowadzi do wzrostu wymagań dotyczących jakości nasion. Nasiona w trakcie zbiorów zazwyczaj charakteryzują się wysoką wilgotnością (Duc i in. 2011). Konieczność ich wysuszenia zaraz po zbiorach dla uzyskania wysokiej jakości i czystości mikrobiologicznej materiału siewnego wymaga zbudowania niewielkich gabarytowo i prostych w konstrukcji aparatów suszących. Dla zachowania najlepszych parametrów należy utrzymać równowagę pomiędzy czasem suszenia a jakością suszonych produktów (Sahni i Chaudhuri 2012). Procesy suszenia są stosowane także tam, gdzie prowadzi się operację mycia nasion w wodzie mającą na celu usunięcie inhibitorów kiełkowania z nasion buraków, zarówno cukrowych jak i ćwikłowych, oraz procesów odkażania w roztworach środków chemicznych i nasączenia mikroelementami (Domoradzki i in. 2000, 2007). Znane są także próby chemicznej skaryfikacji nasion stężonymi kwasami (Al-Sharif 2007, Stidham i in. 1980, Rostami i Shasavar 2009). W przypadku stosowania technologii zwęglania okrywy nasiennej nasion buraków za pomocą stężonego kwasu siarkowego jednym z etapów jest suszenie nasion i w związku z tym konieczne będzie zaprojektowanie suszarki, w której nasiona przetrzymywane będą do ustalenia pożądanej wilgotności po obróbce w kwasach i odmyciu. Ponadto operacje zaprawiania nasion bez suszenia można prowadzić tylko bezpośrednio przed siewem.

Szybkie usunięcie wody z nasion narzuca konieczność doprowadzenia dużych ilości ogrzanego i/lub osuszonego powietrza. Dobór wentylatorów dla suszarki wymaga znajomości oporów przepływu powietrza przez aparaturę, a zwłaszcza przez warstwę suszonych nasion, w tym przypadku nasion buraków ćwikłowych.

Opory przepływu powietrza przez porowatą warstwę nasion, w szerokim zakresie wartości liczby Reynoldsa, opisuje zmodyfikowane Darcy-Weisbacha – równanie Leva (Serwiński 1971):

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{1}{d_z} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \rho \left[\frac{(1 - \varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} \cdot \varphi^{3-n} \right] \quad (1)$$

Liczba Re jest obliczana dla prędkości gazu przeliczonej na pusty przekrój aparatu i dla średnicy zastępczej nasion d_z pozyskanej z analizy sitowej.

$$\text{Re} = \frac{u \cdot d_z}{\nu} \quad (2)$$

Praca miała na celu wyznaczenie zależności współczynnika oporów przepływu powietrza przez warstwę nasion buraków w suszarce komorowej od liczby Reynoldsa. Znajomość współczynnika oporów pozwala na zaprojektowanie wysokości warstwy w suszarce dla danego wentylatora lub dobrania wentylatora zapewniającego optymalny czas suszenia dla założonej wysokości złoża.

MATERIAŁY I METODY

Nasiona buraka ćwikłowego są formą pośrednią między torebką a orzeszkiem, stanowiąc formę zewnętrzną zwaną kłębkim o kształcie zbliżonym do kulistego. Materiałem do badań były nasiona buraka ćwikłowego o wilgotności 8,2%. Wilgotność nasion wyznaczono metodą suszarkową wg normy PN-R-65950. Gęstość właściwą i gęstość usypową nasion buraka wyznaczono metodą ważenia w cylindrze miarowym. Porowatość złoża nasion obliczono z zależności (Serwiński 1971, Frączek i Wróbel 2002):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_u}{\rho} \quad (3)$$

$$\varphi = \sqrt[3]{\frac{a \cdot b \cdot c}{c^3}} \quad (4)$$

Średnią masową średnicę de Brouckere'a dla nasion buraka wyznaczono metodą analizy sitowej (Heim 1996):

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

Nasiona buraków cechowały się gęstością właściwą i usypową wynoszącą odpowiednio 443 i 265 kg·m⁻³. Wyznaczona porowatość materiału wynosiła 0,4, a czynnik kształtu był równy 0,9.

Tabela 1. Analiza sitowa nasion buraka ćwikłowego
Table 1. Screen analysis of beetroot seed

Lp. No	Średnica sita Screen mesh size d_i (mm)	Średnica zastępcza Equivalent diameter d_{zi} (mm)	Masa frakcji Mass of fraction m_i (g)	Udział frakcji Fraction share q (%)
1	6,0	6,3	0,000	0,00
2	5,0	5,3	2,765	2,37
3	4,5	4,8	8,280	8,30
4	4,0	4,3	21,98	22,05
5	3,5	3,8	22,85	22,92
6	3,0	3,3	35,66	35,77
7	2,8	2,9	5,050	5,06
8	2,6	2,7	3,115	3,12
Razem – Total			99,715	100,00

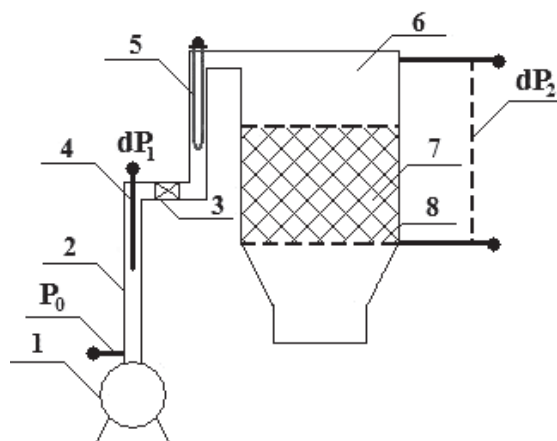
Przeprowadzona analiza sitowa pozwoliła na wyznaczenie średniej średnicy de Brouckere'a. Dla badanego materiału wynosiła ona $3,73 \cdot 10^{-3}$ m.

Aparatura

Suszarka komorowa, w której przeprowadzono badania suszenia nasion, była zasilana ciepłym powietrzem. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 1. Składało się ono z:

- pięciostopniowego wentylatora powietrza o spiętrzeniu 16 MPa i wydajności $V = 0,14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- rurociągów z zaworem doprowadzających powietrze do komory suszącej;
- elektrycznego zagrzewacza powietrza o mocy 4,5 kW z regulatorem tyrystorowym,
- rurki Prandtla połączonej z manometrem wodnym do pomiaru prędkości powietrza w rurociągu,
- komory suszącej o średnicy 0,4 m i wysokości 0,7 m z dnem sitowym płaskim o średnicy otworów 1 mm,
- komory posiadającej na powierzchni bocznej, wzdłuż linii pionowej, króćce pomiarowe co 100 mm licząc od dna sitowego, do zamocowania sond mierzących ciśnienie, podłączonych do manometrów wodnych.

Dla uniknięcia wywiewania nasion z komory suszącej zastosowano odwrócony przepływ powietrza z góry do dołu.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego. 1 – wentylator, 2 – rurociąg doprowadzający powietrze, 3 – zawór, 4 – rurka Prandtla do pomiaru prędkości przepływu 5 – grzałka o mocy 4,5 kW, 6 – komora suszarnicza, 7 – złożo (nasiona buraka), 8 – sito, P_0 – ciśnienie na wentylatorze, dP_1 – różnica ciśnień statycznego i dynamicznego, dP_2 – różnica ciśnień na warstwie

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stand. 1 – fan, 2 – air supplying pipeline, 3 – valve, 4 – Prandtl head for airflow velocity measurement, 5 – heater, 6 – drying chamber, 7 – bed, 8 – screen, P_0 – fan pressure, dP_1 – difference between static and dynamic pressure, dP_2 – pressure difference through bed

Wentylator (1) tłoczy powietrze przez rurociąg doprowadzając je do komory suszarniczej (6). W rurociągu doprowadzającym znajduje się rurka Prandtla do pomiaru prędkości przepływu (4) i grzałka o mocy 3x1500 W, składająca się z trzech elementów grzejnych (5). Na rurociągu znajdują zawór (3), który służy do regulacji natężenia przepływu tłoczonego powietrza. Średnica rurociągu doprowadzającego powietrze wynosi 0,053 m, a średnica wewnętrzna komory suszarniczej wynosi 0,4 m. Nasiona buraka spoczywają na sicie.

Różnicę ciśnień dynamicznego i statycznego na rurce Prandtla dP_1 i spadek ciśnienia na warstwie dP_2 mierzono z dokładnością do 1 mm słupa H_2O . Pomiar ciśnienia był średnią dla kolejnych obrotów rurki Prandtla w rurociągu o 90° . Prędkość powietrza liczone z zależności uwzględniającej temperaturę i ciśnienie atmosferyczne powietrza:

$$U = 1,0001 \cdot \sqrt{574,2 \cdot t + 156842,77} \cdot \sqrt{\frac{P_1}{P_{at}}} \quad (6)$$

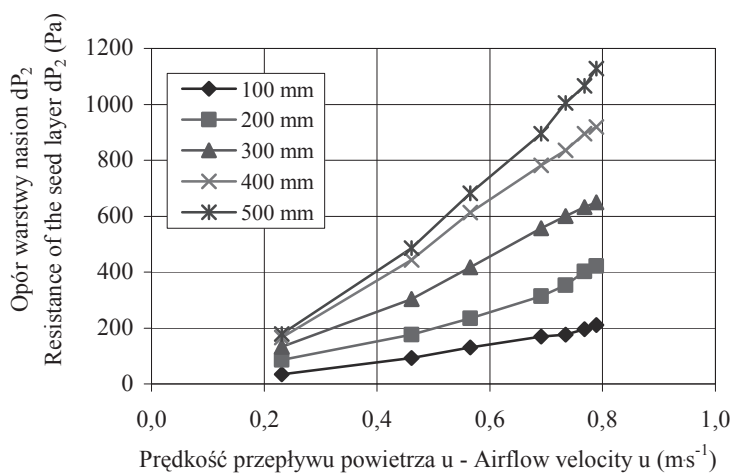
Prędkość w rurociągu przeliczano na prędkość powietrza przez pusty przekrój aparatu:

$$u = U \cdot \frac{f}{F} = U \cdot \frac{d^2}{D^2} \quad (7)$$

WYNIKI BADAŃ

Nasiona suszono powietrzem o temperaturze wlotu do komory suszącej równej 40°C. Prędkość przepływu powietrza wyznaczono z pomocą rurki Prandtla w rurociągu doprowadzającym powietrze. Określono także różnice ciśnień na złożu dP_2 nasion buraka w cylindrycznej części suszarki. Obliczano jednostkowy spadek ciśnienia w złożu nasion dP_2/L_i .

Dla różnych wysokości złoża nasion buraka L_i w zbiorniku suszarki: 100, 200, 300, 400 i 500 mm wyznaczono spadki ciśnienia w zależności od prędkości przepływu powietrza przeliczonej na pusty przekrój aparatu (rys. 2). Dla obliczenia prędkości powietrza przepływającego przez warstwę nasion przyjęto średnicę wewnętrzną aparatu.



Rys. 2. Zależność spadku ciśnienia dP_2 na warstwie nasion o różnej wysokości w zależności od prędkości przepływu powietrza przeliczonej na pusty przekrój aparatu

Fig 2. Relationship between pressure gradient through the seed bed with different height and air-flow velocity converted to apparatus empty cross-section

Iloraz spadku ciśnienia w warstwie nasion do wysokości warstwy jest nazywany jednostkowym oporem przepływu. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu powietrza u rośnie jednostkowy spadek ciśnienia w warstwie nasion buraka (rys. 3). Do

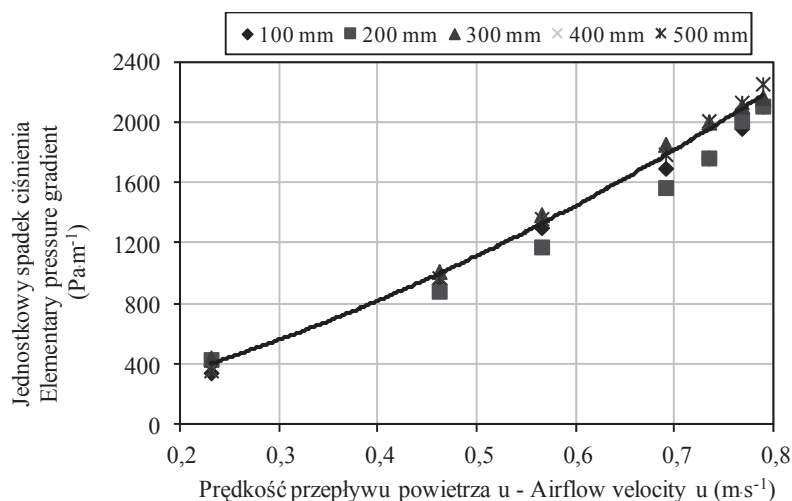
opisu jednostkowego oporu przepływu zastosowano zmodyfikowane równanie Erguna w postaci (Ergun 1952, Molenda i in. 2006):

$$\frac{dP_2}{L} = a \cdot u^2 + b \cdot u \quad (8)$$

Równanie to dla danych doświadczalnych przyjmuje wartości:

$$\frac{dP_2}{L} = 1834,1 \cdot u^2 + 1309 \cdot u \quad \text{dla } u \in (0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}, 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}), R^2 = 0,999 \quad (9)$$

Równanie Erguna (9) dobrze opisuje zmierzone wielkości jednostkowego spadku ciśnienia na warstwie nasion dP_2/L w zależności od prędkości przepływu powietrza u przeliczonej na pusty przekrój aparatu. Współczynnik determinacji R^2 jest bliski jedności, co wskazuje na dobre dopasowanie równania do danych doświadczalnych.

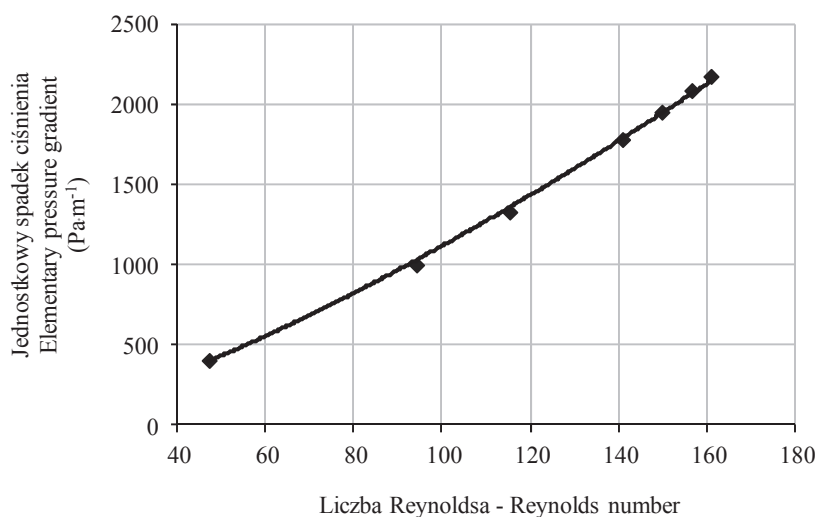


Rys. 3. Zależność jednostkowego spadku ciśnienia od prędkości powietrza przeliczonej na pusty przekrój aparat

Fig. 3. Relationship between elementary pressure gradient and airflow velocity converted to apparatus empty cross-section

Wyznaczono również zależność spadku jednostkowego ciśnienia powietrza na warstwie nasion buraków w zależności od obliczonej liczby Reynoldsa (rys. 4):

$$\frac{dP_2}{L} = 2 \cdot \text{Re}^{1,38} \quad \text{dla } \text{Re} \in (50, 160), R^2 = 0,999 \quad (10)$$



Rys. 4. Zależność jednostkowego spadku ciśnienia od liczby Reynoldsa

Fig. 4. Relationship between elementary pressure gradient and Reynolds number

Równanie Leva (1) opisujące opory przepływu powietrza przez porowatą warstwę nasion przekształcono do postaci (11), która umożliwiła wyznaczenie współczynnika oporów (tab. 3.).

$$\lambda = \frac{\frac{dP}{L}}{\frac{1}{d_z} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \left[\frac{(1-\varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} \cdot \varphi^{3-n} \right]} \quad (11)$$

Dla ruchu burzliwego $Re > 100$ współczynnik oporów przyjmuje postać (Serwiński 1971):

$$\lambda = \frac{K_2}{Re^{0,1}} \quad (12)$$

Po przekształceniu równania (12) można obliczyć stałą K_2 dla badanych nasion buraka. Podstawiając liczbę Re i odpowiadające im wartości współczynnika oporów przy $Re > 100$ do tego równania otrzymano średnią wartość dla stałej K_2 wynoszącej 15,03.

Tabela 3. Współczynnik oporów obliczony na podstawie danych doświadczalnych
Table 3. The resistance coefficient determined on the basis of experimental data

Prędkość Velocity u ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\frac{dP_2}{L}$ ($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)	Liczba Re Reynolds number	Współczynnik oporów Resistance coefficient λ
0,789	2174,4	160,9	23,25
0,768	2086,1	156,6	23,56
0,735	1951,3	149,8	24,08
0,691	1780,5	140,9	24,85
0,565	1328,4	115,3	27,69
0,462	998,1	94,1	31,20
0,231	402,5	47,0	50,37

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i obliczeń nasuwają się następujące wnioski:

1. Spadek ciśnienia na warstwie nasion buraków w komorze suszarki zależy od wysokości warstwy nasion i prędkości przepływu powietrza.
2. Zależność oporu jednostkowego na warstwie nasion dobrze opisuje równania Erguna:

$$\frac{dP_2}{L} = 1834,1 \cdot u^2 + 1309 \cdot u \text{ dla } 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < u < 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ przy } R^2 = 0,999$$

3. Średnia wartość stałej K_2 dla nasion buraka ćwikłowego wynosi 15,03, co pozwala na opisanie zależności współczynnika oporów od liczby Reynoldsa równaniem: $\lambda = \frac{15,03}{\text{Re}^{0,1}}$.

PIŚMIENNICTWO

- Al-Sherif E.A., 2007. Effect of Chemical Scarification, Salinity and Preheating on Seed Germination of *Prosopis farcta* (Banks & Soland.) Mactor. American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science, 2 (3) 227-230.
- Domoradzki M., Holcman J., Korpala W., 2000. Ługowanie inhibitorów kiełkowania z nasion buraka ćwikłowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Inżynieria Chemiczna i Procesowa Z. 28 (839), 45-53.

- Domoradzki M., Korpala W., Witek Z., 2007. Badania procesu ługowania szlifowanych nasion buraka ćwikłowego. *Inżynieria Rolnicza*, 5 (93), 115-121.
- Duc L.A., Han J.W., Keum D.H., 2011. Thin layer drying characteristic of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of Stored Product Research*, 47(2011), 32-38.
- 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.
- Heim A., 1996. Procesy mechaniczne i urządzenia do ich realizacji. Wyd. Politechniki Łódzkiej.
- Łukaszuk J., Molenda M., Horabik J., 2006. Wpływ sposobu formowania złoża pszenicy na opór przepływu powietrza. *Acta Agrophysica*, 8(4), 881-991.
- PN-R-65950:1994. Materiał siewny. Metody badania nasion.
- Rostami A.A., Shasavar A., 2009. Effects of Seed Scarification on Seed Germination and Early Growth of Olive Seedlings. *Journal of Biological Sciences*, 9, 825-828.
- Sahni E.K., Chaudhuri B., 2012. Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches. *International Journal of Pharmaceutics*, 434 (2012), 334-348.
- Serwiński M., 1971. *Zasady Inżynierii Chemicznej*. WNT, Warszawa, 108-114.
- Stidham N.D., Ahring R.M., Powell J., Claypool P.L., 1980. Chemical scarification, Moist Prechilling and Thiourea Effects on Germination of 18 Shrub Species. *Journal of Range Management*, Vol. 33, No. 2, 115-118.

STUDY OF AIRFLOW RESISTANCE THROUGH BEETROOT SEED BED

Joanna Kaniewska, Marek Domoradzki, Lidia Wardecka

Department of Chemical and Food Technology and Apparatus,
University of Technology and Life Science in Bydgoszcz
ul. Seminaryjna 3, 85-326 Bydgoszcz
e-mail: joanna.kaniewska@utp.edu.pl

Abstract. The paper presents a study on the air flow resistance of beetroot seed bed. Air pressure drop across a porous layer of the seed, within a wide range of Reynolds number values, was described with a modified Levy equation. Determination of coefficient of resistance depending on Reynolds number allows to design a height of the layer in an dryer for a particular fan or to select the fan for the assumed height of the bed, which ensures the optimum drying time. Physical properties of beetroot seeds were determined. Pressure drop in the different heights of the bed were estimated. This allowed to determine the elementary pressure gradient. Relationship between the elementary pressure gradient and airflow velocity was described by Ergun equation. To describe the relationship between the coefficient of resistance and a constant Reynolds number friction $K_2 = 15.03$ was calculated.

Key words: flow resistance of particulate material, seed drying