

## OPORY PRZEPLYWU POWIETRZA PRZEZ SUSZARKĘ STOŻKOWĄ WYPEŁNIONĄ NASIONAMI FASOLI

Joanna Kaniewska, Marek Domoradzki

*Katedra Technologii i Aparatury Przemysłu Chemicznego i Spożywczego,  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy*

**Streszczenie.** W pracy przeprowadzono badania oporu przepływu powietrza przez złożę nasion fasoli w części stożkowej suszarki. Starano się znaleźć zależności spadku ciśnienia na złożu nasion fasoli od prędkości przepływającego powietrza w suszarce stożkowej. Do opisu szukanej zależności posłużono się równaniem Erguna. Otrzymane wyniki podstawiono także do równania Leva, celem wyznaczenia współczynnika oporu nasion fasoli dla przepływającego powietrza.

**Słowa kluczowe:** opory przepływu powietrza, suszarka stożkowa, nasiona fasoli

### Wstęp

Istnieje problem z zachowawczą hodowlą nasion fasoli, spowodowany obecnością szkodliwych mikroorganizmów na ich powierzchni. Podstawą pomyślnych i dużych plonów są czyste mikrobiologicznie, o wysokiej zdolności i energii kiełkowania nasiona. W związku z wprowadzanymi przez Unię Europejską ograniczeniami stosowania chemicznych środków ochrony roślin, powstaje konieczność poszukiwania nowych metod odkażania materiału siewnego. Rozwiązaniem może okazać się zaprojektowanie urządzenia suszarniczego pozwalającego na jednoczesne odkażanie materiału siewnego fasoli, w którym czynnikiem odkażającym jest gorące powietrze.

Termoterapia gorącym powietrzem sprawdza się w przypadku nasion fasoli zwyczajnej, gdyż są one odporne na wygrzewanie w temperaturze do 80°C [Maude 1996]. W wysokich temperaturach następuje także eliminacja szkodliwych mikroorganizmów na powierzchni nasion.

Nasiona fasoli zwyczajnej po zbiorze muszą być dosuszane do wilgotności zapewniającej ich bezpieczne przechowywanie. W celu zaprojektowania efektywnego urządzenia suszarniczego, w którym jednocześnie mogło być prowadzone odkażanie nasion, potrzebne są badania oporów przepływu przez warstwy o różnej wysokości, o różnych wilgotnościach początkowych materiału czy różnej gęstości usypowej. Znane są badania dotyczące wyznaczenia tych zależności dla różnych nasion zbóż, nasion roślin olejowych, nasion warzyw i innych [Nimkar i in. 2002].

## Cel pracy

Celem niniejszego opracowania jest znalezienie zależności oporów liniowych przez złożę nasion fasoli w zależności od prędkości przepływającego powietrza w suszarce stożkowej. Zakłada się, że model suszarki stożkowej pozwoli na suszenie nasion wilgotnych oraz pozwoli na wysokotemperaturowe odkażanie nasion w tym samym urządzeniu.

W pracy badano jednostkowy spadek ciśnienia wzdłuż warstwy nasion w stożkowej suszarce w zależności od wysokości złoża i prędkości przepływu powietrza. Poszukiwano metody obliczania średniego przekroju dla warstwy nasion w stożku suszarki o znanej wysokości złoża, celem obliczenia prędkości przepływu powietrza przez złożę.

Badania pozwolą na opracowanie założeń do budowy prototypu urządzenia przemysłowego ze stożkowym spustem dla odkażania termicznego nasion fasoli.

## Materiały i metody

Materiałem do badań była fasola zwyczajna (*Phaseolus vulgaris*) odmiany Igołomska. Wilgotność nasion wyznaczono metodą suszarkową wg normy PN-R-65950. Gęstość właściwą oraz usypową nasion wyznaczono metodą ważenia w cylindrze miarowym. Wszystkie czynności przy oznaczaniu właściwości fizycznych nasion powtórzono 10 razy. Znając gęstość usypową  $\rho_u$  oraz właściwą  $\rho$  obliczano porowatość złoża ze wzoru:

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

Zastępczą średnicę ziarna  $d_z$  obliczono jako średnicę kuli o objętości równej średnicy objętości danych nasion ze wzoru:

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi \cdot \rho \cdot L}} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Czynnik kształtu obliczano z równania Mohsenina [1986]:

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

gdzie:

a, b, c – wymiary nasion, kolejno grubość, szerokość i długość [m].

Badania spadku ciśnienia wzdłuż wysokości złoża nasion wykonano w urządzeniu suszarniczym przedstawionym na rysunku 1. Wentylator (1) tłoczył powietrze przez rurociąg doprowadzając je do komory suszarniczej (9). W rurociągu doprowadzającym (7) znajdowało się urządzenie do pomiaru prędkości przepływu (4) sprzężone z manometrem typu U-rurka oraz grzałka o mocy 4 500 W (6). Między rurką Prandtla mierzącą różnicę ciśnienia statycznego i ciśnienia dynamicznego a grzałką znajdował się zawór (5), który służył do regulacji natężenia przepływu tłoczonego powietrza.

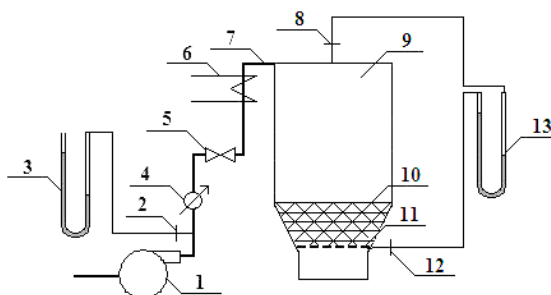
## Opory przepływu powietrza...

Tabela 1. Właściwości fizyczne nasion fasoli

Table 1. Physical properties of bean seeds

Wilgotność początkowa W [%]	Gęstość właściwa $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Gęstość usypowa $\rho_u$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Porowatość $\epsilon$ [-]	Masa 1000 nasion M [g w 1000 szt.]	Liczność L [szt·g <sup>-1</sup> ]	Zastępcza średnica $d_z$ [m]	Czynnik kształtu $\phi$ [-]
7,1	1244	822	0,339	190,25	5,256	0,00664	0,59

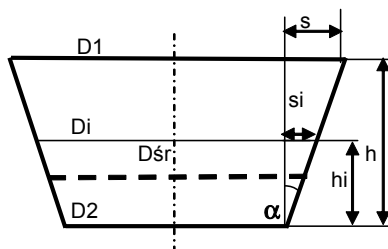
Źródło: obliczenia własne



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego (1 - wentylator, 2 - króciec pomiarowy, 3 - manometr typu U -rurka, 4 - rurka Prandtla, 5 - zawór, 6 - grzałka o mocy 4 500 W, 7 - rurociąg doprowadzający powietrze, 8 - króciec pomiarowy, 9 - komora suszarnicza, 10 - złoże (nasiona fasoli), 11 - sito; 12 - króciec pomiarowy, 13 - manometr typu U-rurka)

Fig. 1. Scheme of the testing station (1 - fan, 2 - measuring pipe, 3 - U -tube manometer, 4 - Prandtl tube, 5 - valve, 6 - heater with a power of 4,500 W, 7 - air supply pipeline, 8 - measuring pipe, 9 - drying chamber, 10 - deposit (bean seeds), 11 - sieve; 12 - measuring pipe, 13 - U-tube manometer)

Stożek komory suszarniczej miał wysokość  $h=0,3$  m i średnicę dolną  $D_2=0,3$  m i górną  $D_1=0,4$  m. Średnica rurociągu doprowadzającego powietrze (7) wynosiła 0,053 m. Nasiona fasoli spoczywały na sicie umocowanym na dnie komory. Powietrze tłoczone było od góry komory do dołu.



Rys. 2. Wymiary stożkowej komory suszarniczej ( $D_i$  - górna średnica stożka dla danej wysokości  $h_i$  warstwy nasion,  $h_i$  - wysokość warstwy nasion)

Fig. 2. Dimensions of the conical drying chamber ( $D_i$  - top cone diameter for the given height  $h_i$  of the seed layer,  $h_i$  - height of the seed layer)

Na rurociągu, pokrywie oraz w części stożkowej komory suszarniczej zainstalowano króćce pomiarowe. Różnicę ciśnień dynamicznego i statycznego  $dP_1$ , wzdłuż warstwy  $dP_2$  oraz ciśnienie za wentylatorem wyznaczano za pomocą manometrów cieczowych z dokładnością do 1 mm H<sub>2</sub>O. Pomiar ciśnienia był średnią z czterech kolejnych pomiarów po obrocie rurki Prandtla o 90°. Pomiarów dokonywano dla pustego aparatu oraz przy trzech różnych wysokościach warstwy nasion fasoli, każda o masie  $m=7,5$  kg. Wysokości warstw wynosiły odpowiednio:  $h_1=0,124$  m,  $h_2=0,214$  m oraz  $h_3=0,285$  m. Tłoczone powietrze miało temperaturę wynoszącą  $30\pm 2^\circ\text{C}$ . Górna średnica warstwy nasion w aparacie stożkowym zależała od wysokości usypania warstwy nasion w stożku (rys. 2.). Oznaczając przez:

$$s - \text{zbieżność stożka}, \quad s = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

$$\text{tg}\alpha - \text{miara połowy kąta zbieżności stożka} \quad \text{tg}\alpha = \frac{s}{h} \quad (5)$$

$$s_i - \text{zbieżność stożka dla wysokości} \quad h_i s_i = \frac{D_i - D_2}{2} = h_i \cdot \text{tg}\alpha \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Stąd górna średnica stożka nasion  $D_i$  na wysokości  $h_i$  jest opisana jako:

$$D_i = D_2 + 2 \cdot h_i \cdot \text{tg}\alpha = D_2 + \frac{2h_i \cdot (D_1 - D_2)}{h} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

Zależność tę w tym przypadku opisuje równanie:

$$D_i = 0,333 \cdot h_i + 0,3 \quad [\text{m}] \quad (8)$$

Natężenie przepływu powietrza  $\dot{V}$  obliczano znając:  $f$  – pole przekroju w rurociągu [ $\text{m}^2$ ] pomiarowym i  $u$  – liniową prędkość przepływu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

$$\dot{V} = u \cdot f \quad [\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}] \quad (9)$$

Do obliczenia natężenia przepływu powietrza zastosowano rurkę Prandtla firmy Kimo, która podaje zależność:

$$\dot{V} = 1,291 \cdot f \cdot \sqrt{dP_1} \quad [\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]. \quad (10)$$

Średnia prędkość przepływu powietrza przez warstwę nasion w stożku liczona w pustym aparacie [ $u$ ] została obliczona z zależności:

$$u_{a,g} = \frac{\dot{V}}{F_{a,g}} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (11)$$

gdzie:

- a, g – indeksy odnoszące się do sposobu obliczania średnich, odpowiednio arytmetycznej i geometrycznej,
- F – pole przekroju przepływu [ $\text{m}^2$ ].

## Opory przepływu powietrza...

Średnia powierzchnia przekroju przepływu  $F$  dla warstwy nasion o wysokości  $h_i$  w stożku przedstawia się następująco:

$$F_{a,g} = \frac{\pi \cdot D_{a,g}^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (12)$$

Średnia średnica dla obliczenia powierzchni przepływu powietrza przez stożek została zdefiniowana dwojako w celu sprawdzenia lepszego dopasowania średniej średnicy:

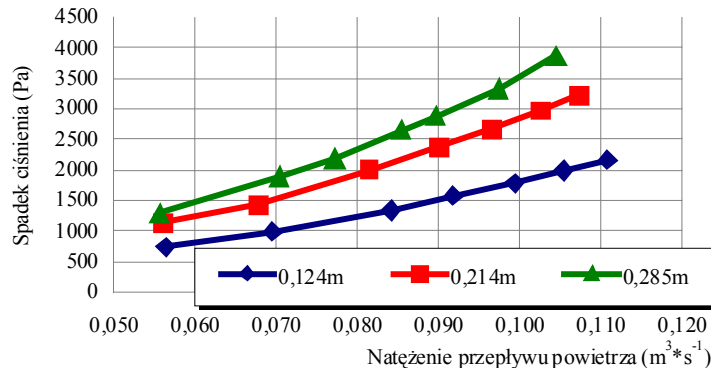
średnia średnica arytmetyczna  $D_a = \frac{(D_2 - D_i)}{2} \quad [\text{m}] \quad (13)$

lub

średnia średnica geometryczna  $D_g = \sqrt{D_2 \cdot D_i} \quad [\text{m}] \quad (14)$

## Wyniki

Dla różnych wysokości złoża nasion fasoli  $h_i$  w stożku suszarki, wyznaczono spadki ciśnienia w zależności od natężenia przepływu powietrza (rys. 3.). Wraz ze wzrostem natężenia przepływu powietrza rośnie różnica ciśnień na warstwie nasion fasoli. Im wyższa warstwa nasion, tym opory przepływu powietrza są większe.



Rys. 3. Zależność spadku ciśnienia  $dP_2$  wzdłuż warstwy nasion fasoli o różnej wysokości w zależności od natężenia przepływu powietrza

Fig. 3. Dependence of the pressure drop  $dP_2$  along the layer of bean seeds of various height on the intensity of air flow

Na podstawie wykonanych pomiarów obliczono jednostkowy spadek ciśnienia na złożu w zależności od prędkości przepływu powietrza. Dla obliczenia prędkości powietrza przepływającego przez warstwę nasion przyjęto średni przekrój aparatu wyliczony na podstawie wzoru 11 i 12 podstawiając wartości: średnie arytmetyczne ze wzoru 13 i średnie geo-

metryczne ze wzoru 14. Do opisu spadku ciśnienia zastosowano zmodyfikowane równanie Erguna [1952] w postaci:

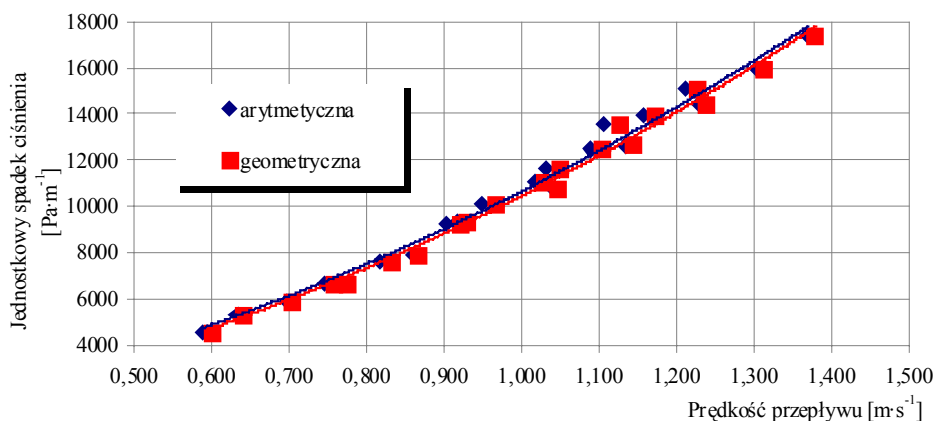
$$\frac{dP_2}{h_i} = u_{a,g}^2 \cdot a + u_{a,g} \cdot b, \quad (15)$$

gdzie:

$dP_2/h_i$  – jednostkowy spadek ciśnienia na złożu [ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ ],  
 $a, b$  – współczynniki.

Tabela 2. Równania Erguna opisujące jednostkowy spadek ciśnienia w stożku suszarki  
 Table 2. Ergun equations describing the unit pressure drop in the drier cone

Obliczanie powierzchni przepływu powietrza	Równanie regresji [ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Współczynnik determinacji $R^2$
Średnia powierzchnia arytmetyczna	$dP_2/h = 6288 \cdot u_a^2 + 4375 \cdot u_a$	0,987
Średnia powierzchnia geometryczna	$dP_2/h = 6391 \cdot u_g^2 + 4074 \cdot u_g$	0,992



Rys. 4. Jednostkowy spadek ciśnienia w zależności od prędkości przepływu powietrza wyliczonej dla średniej średnicy arytmetycznej i geometrycznej przekroju stożka

Fig. 4. Unit drop pressure depending on the speed of air flow calculated for the average arithmetic and geometrical diameter of the cone section

Na podstawie danych zawartych w tabeli 2 i na wykresie 4 można stwierdzić, że równanie Erguna (14) dobrze opisuje jednostkowy spadek ciśnienia wzdłuż warstwy  $dP_2/h$  w zależności od obliczonej prędkości przepływu powietrza  $u$ . Współczynniki determinacji są bliskie jedności, co wskazuje na dobre dopasowanie równań do danych doświadczalnych. Obydwie metody obliczania średniej prędkości przepływu przez warstwę, zarówno średnia arytmetyczna jak i geometryczna, dość dobrze opisują badany proces.

Opory przepływu powietrza...

Otrzymane wyniki podstawiono do równania zmodyfikowanego Darcy – Weisbacha (równania Leva) dla wyznaczenia współczynnika oporu nasion fasoli dla przepływającego powietrza [Koch i in. 1998]:

$$\frac{dP_2}{h_i} = \lambda \cdot \left\{ \frac{1}{d_z} \cdot \frac{u_g^2}{2} \cdot \rho \cdot \left[ \frac{(1-\varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} \cdot \varphi^{3-n} \right] \right\}, \quad (16)$$

gdzie:

$\rho = 1,154 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}]$  - gęstość powietrza w temperaturze 30°C,

$d_z = 0,00664 \text{ [m]}$  - średnia średnica nasion fasoli,

$\varphi = 0,9$  - czynnik kształtu,

$n = 1,9$  - wykładnik potęgi ruchu burzliwego dla liczby Reynoldsa  $Re > 100$ ,

$\mu = 18,6 \cdot 10^{-6} \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$  - lepkość powietrza w 30°C.

Tabela 3. Obliczanie współczynnika oporu warstwy nasion wg równania Leva (16)

Table 3. Calculation of the seed layer resistance coefficient acc. to the Leva equation

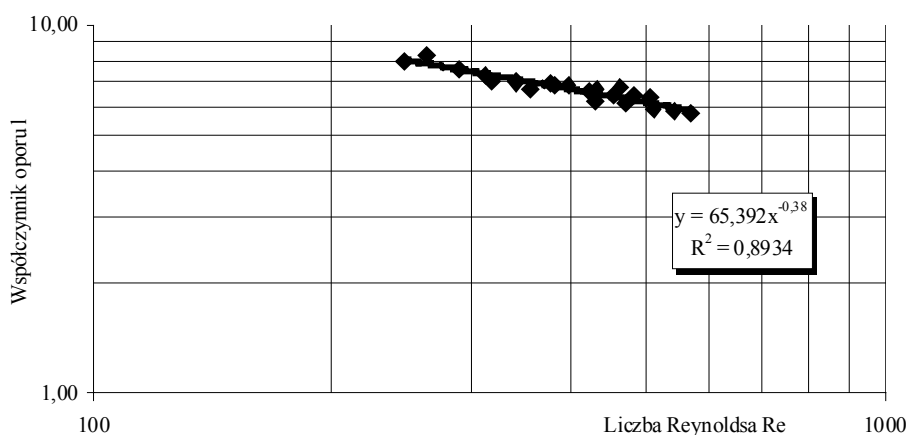
$\frac{dP}{h_i}$ [Pa·m <sup>-1</sup> ]	$u_g$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$\frac{u_g^2}{2}$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	$\frac{1}{d_z}$ [m <sup>-1</sup> ]	Re	$\left[ \frac{(1-\varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} \cdot \varphi^{3-n} \right]$ [-]	$\left\{ \frac{1}{d_z} \cdot \frac{u_g^2}{2} \cdot \rho \cdot [-] \right\}$ [Pa]	Współczynnik oporu $\lambda$ [-]
4542	0,599	0,359	150,6	247	9,1	568,6	7,99
5361	0,640	0,409	150,6	264	9,1	648,1	8,27
5931	0,701	0,492	150,6	289	9,1	779,0	7,61
6641	0,757	0,573	150,6	312	9,1	907,7	7,32
6644	0,774	0,598	150,6	319	9,1	947,4	7,01
7656	0,831	0,691	150,6	342	9,1	1093,6	7,00
7932	0,864	0,747	150,6	356	9,1	1183,1	6,70
9290	0,919	0,845	150,6	379	9,1	1337,9	6,94
9362	0,929	0,863	150,6	383	9,1	1365,9	6,85
10081	0,964	0,930	150,6	397	9,1	1472,8	6,85
10755	1,046	1,095	150,6	431	9,1	1733,2	6,21
11089	1,028	1,057	150,6	424	9,1	1673,6	6,63
11664	1,048	1,098	150,6	432	9,1	1738,9	6,71
12464	1,102	1,215	150,6	454	9,1	1923,8	6,48
12653	1,142	1,304	150,6	470	9,1	2064,3	6,13
13556	1,124	1,264	150,6	463	9,1	2001,4	6,77
13919	1,171	1,370	150,6	482	9,1	2169,9	6,41
14393	1,236	1,528	150,6	509	9,1	2419,7	5,95
15053	1,225	1,500	150,6	505	9,1	2375,0	6,34
15974	1,311	1,719	150,6	540	9,1	2721,5	5,87
17398	1,378	1,900	150,6	568	9,1	3008,8	5,78

Źródło: obliczenia własne

Określono zależność współczynnika oporu przepływu powietrza w suszarce stożkowej w funkcji liczby Reynoldsa:

$$Re = \frac{u_g \cdot \rho \cdot d_z}{\mu} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{65,4}{Re^{0,38}} \quad (18)$$



Rys. 5. Zależność współczynnika oporu  $\lambda$  od liczby Reynoldsa Re  
 Fig. 5. Dependence of the  $\lambda$  resistance coefficient on the Reynolds number Re

## Wnioski

1. Jednostkowy spadek ciśnienia wzdłuż warstwy nasion fasoli zależy od średniej średnicy przepływu i szybkości przepływu powietrza. Wraz ze wzrostem wysokości warstwy nasion i szybkości przepływu powietrza spadek ciśnienia rośnie.
2. Zależność oporu hydraulicznego wzdłuż warstwy dokładnie opisuje równanie Erguna dla średniego przekroju przepływu powietrza z zastosowaniem średniej średnicy geometrycznej.
3. Zależność współczynnika oporu liniowego powietrza przepływającego przez warstwę nasion fasoli w suszarce stożkowej od liczby Reynoldsa Re jest dana zależnością dla ruchu burzliwego w postaci równania (18).
4. Dla wyznaczania jednostkowego spadku ciśnienia powietrza przez warstwę nasion w suszarce stożkowej zaleca się używanie do obliczeń średniego przekroju przepływu powietrza F średnią średnicę geometryczną  $D_g$ .



## **Bibliografia**

- Ergun S.** 1952. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress, 48. ISSN 0360-7275.
- Koch R., Noworyta A.** 1998. Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej. WNT. Warszawa. ISBN 83-204-2262-0.
- Maude R.B.** 1996. Seedborne Diseases and Their Control. Horticulture Research International Wellesbourne. CAB International.
- Mohsenin N.N.** 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Public. New York.
- Nimkar P.M., Chattopadhyay P.K.** 2002. Airflow resistance of Green gram. Biosystems Engineering 82(4), s. 407-414.
- PN-R-65950:1994. Materiał siewny. Metody badania nasion.

## **RESISTANCES OF AIR FLOW THROUGH A CONICAL DRIER FILLED WITH BEAN SEEDS**

**Abstract.** In this work, tests of the resistance of air flow through a bean seed deposit in the conical part of the drier were carried out. Attempts were made to find the relationship between the drop of pressure on the bean seed deposit and the speed of flowing air in the conical drier. For the description of the relationship being sought, the Ergun equation was used. The received results were also substituted for the Leva equation in order to determine the bean seed resistance coefficient for the flowing air.

**Key words:** resistances of air flow, conical drier, bean seeds

### **Adres do korespondencji:**

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