

Elżbieta Kusińska, Paweł Olejarczyk*

WPLYW GEOMETRYCZNYCH PARAMETRÓW OTWORU I ŚREDNICY ZASTĘPCZEJ MATERIAŁU ROŚLINNEGO NA OBJĘTOŚCIOWE NATEŻENIE PRZEPŁYWU

Streszczenie. Przedstawiono wyniki pomiaru natężenia przepływu materiału roślinnego o zmiennej zawartości wody w zależności od średnicy hydraulicznej otworu i średnicy zastępczej wybranych nasion i ziaren. Materiał roślinny stanowiły nasiona łubinu i rzepaku oraz ziarna owsa. Otwory wysypowe charakteryzowały się zmiennym kształtem, wielkością i położeniem. Zawartość wody w badanym materiale wynosiła od 0,089 do 0,145 kg·(kg s.m.)⁻¹. Rozmiar średnicy hydraulicznej otworów wahał się od 4,0 do 11,4 cm, a średnicy zastępczej materiału od 1,62 do 6,47 mm. Badania natężenia przepływu przeprowadzono na skalę laboratoryjną. Uzyskane wyniki badań poddano analizie statystycznej. Wykazała ona istotny wpływ na wyniki badań natężenia przepływu kształtu i położenia otworu, jego średnicy hydraulicznej oraz średnicy zastępczej materiału.

Słowa kluczowe: ziarno, natężenie przepływu, zawartość wody, średnica hydrauliczna otworu, średnica zastępcza materiału

WSTĘP

W technice rolniczej mamy do czynienia z materiałami ziarnistymi, takimi jak: ziarno zbóż oraz produkty jego rozdrobnienia, nasiona innych roślin uprawowych, pasze przemysłowe, cukier i szereg innych. Materiał ziarnisty stanowi zbiór indywidualnych cząstek stałych pozostających we wzajemnym kontakcie, przy czym przestrzenie między cząstkami wypełnione są gazem lub cieczą [Ewalt i Buelow 1963]. Istotne znaczenie dla przebiegu wielu operacji technologicznych mają takie właściwości fizyczne jak: gęstość usypowa, granulacja, współczynnik tarcia, twardość, wilgotność i inne [Horabik 2001]. Dlatego ważne jest ich dokładne poznanie. Pewne właściwości badanych cząstek można wyrazić w odniesieniu do średnicy zastępczej [Molenda 1998]. Znajomość właściwości materiałów sypkich jest niezbędna do opracowania prawidłowego przebiegu operacji technologicznych [Schwedes 1985]. Jedną z często spotykanych operacji technologicznych jest wypływ materiału roślinnego ze zbiorników. Był on przedmiotem badań Browna

* Dr hab. Elżbieta Kusińska, Katedra Inżynierii i Maszyn Spożywczych, mgr inż. Paweł Olejarczyk, Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego Akademii Rolniczej w Lublinie

i Richardсона [1960], Changa i in. [1984, 1988], Ewalta i Buelowa [1963], Fowlera i Glastonbury'ego [1959], Gregory'ego i Fedlera [1987], Moyseya i in. [1988] oraz Beverloo i in. [1961]. Na podstawie wyników badań opracowano amerykańską normę ASAE D274.1 [1993], która zaleca obliczanie natężenia przepływu przez poziome i pionowe otwory z następującego wzoru:

$$Q = C_o A D^n \quad (1)$$

gdzie: Q – objętościowe natężenie przepływu, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,

A – powierzchnia otworu, cm^2 ,

D – średnica hydrauliczna otworu, cm ,

C_o – współczynnik, którego wartości dla niektórych zbóż i nasion są podane w normie, $\text{m}^3 \cdot (\text{cm}^{(n+2)} \cdot \text{h})^{-1}$,

n – wykładnik potęgi (w większości przypadków o wartości od 0,5 do 1,0).

Z badań Kusińskiej i Olejarczyka [2003a, b] wynika, że objętościowe natężenie przepływu zależy również w dużym stopniu od zawartości wody w materiale oraz położenia otworu. Uzyskane wyniki z eksperymentów znacznie różniły się od obliczonych na podstawie normy. Mogło to być spowodowane różnicami we właściwościach fizycznych między polskimi i amerykańskimi odmianami. W celu dokładniejszego opisanie tego procesu przeprowadzono badania natężenia przepływu nasion i ziaren o zróżnicowanym kształcie i wymiarach oraz różnej zawartości wody przez poziome otwory okrągłe i kwadratowe, położone centrycznie i niecentrycznie.

MATERIAŁ I METODY

Badany materiał roślinny stanowiły nasiona łubinu żółtego odmiany Piast i rzepaku odmiany Star oraz ziarna owsa odmiany Dragon. Nasiona rzepaku należą do nasion małych i okrągłych, nasiona łubinu żółtego są duże i mają znaczną sferyczność, a ziarna owsa są typowym przykładem ziarna podłużnego, o niedużej sferyczności. Zawartość wody w badanym materiale wynosiła 0,089, 0,120 i 0,145 $\text{kg} \cdot (\text{kg s.m.})^{-1}$. Pomiary objętościowego natężenia przepływu przez otwory przeprowadzono na stanowisku badawczym w warunkach laboratoryjnych. Głównym elementem stanowiska był walcowy zbiornik płaskodenny o średnicy 36,5 cm i wysokości 79 cm, który był wyposażony w komplet wymiennych den z otworami o wymaganym kształcie i położeniu. W badaniach zastosowano otwory okrągłe o średnicach 4,0; 5,6; 8,0 i 11,4 cm oraz otwory kwadratowe o wymiarze boku równym średnicom otworów okrągłych. Otwory usytuowane były centrycznie i niecentrycznie. Odległość otworu położonego niecentrycznie od ściany zewnętrznej zbiornika była jednakowa i wynosiła 27 mm. Cała konstrukcja opierała się na stalowym statywie zapewniającym stabilność zbiornika. Pod zbiornikiem głównym znajdował się zbiornik pomocniczy, do którego po otwarciu zasuwy przesypywano ziarno. Zbiornik górny napełniano ziarnem o jednakowej objętości (70 dm^3), następnie czekano 5 godzin w celu uzyskania ustabilizowanej struktury materiału i otwierano zasuwę otworu wylotowego. Czas przepływu mierzono z dokładnością 0,01 s. Pomiary przeprowadzono w pięciu powtórzeniach.

Objętościowe natężenie przepływu określano ze wzoru:

$$Q = 3600 \frac{V}{t} \quad (2)$$

gdzie: Q – objętościowe natężenie przepływu, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
 V – objętość przesypanego materiału, m^3 ,
 t – czas przesypywania, s.

W badaniach uwzględniano objętość surowca, który nie uległ wysypianiu ze zbiornika.

Dokonano oznaczeń właściwości fizycznych surowca zgodnie z obowiązującymi normami, takich jak: gęstość utrzęsiona i usypowa, kąt zsypu i usypu, masa 1000 nasion. Pomiary te przeprowadzono w trzech powtórzeniach. Dodatkowo określono wymiary geometryczne dla 100 nasion o przyjętych poziomach zawartości wody, obliczono średnicę równoważną i sferyczność według równania Mohsenina.

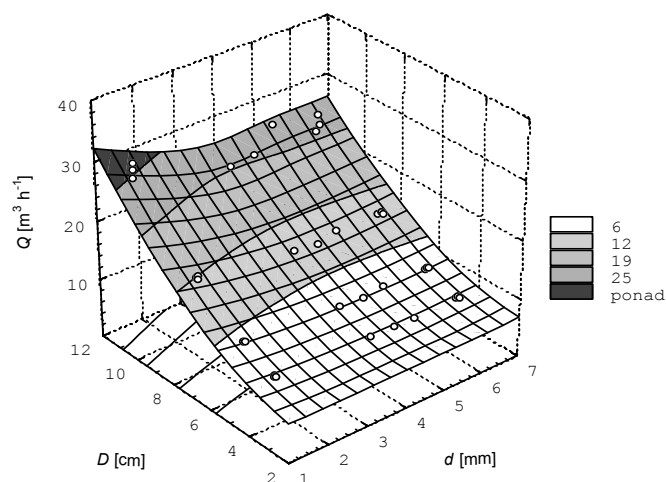
WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań właściwości fizycznych i geometrycznych materiału w zależności od przyjętych zawartości wody. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem zawartości wody w materiale wzrastała wielkość kąta usypu i zsypu oraz masa 1000 nasion. Następował również wzrost średnicy zastępczej materiału i współczynnika sferyczności przy jednoczesnym spadku wartości gęstości usypowej i gęstości utrzęsionej. Najmniejszą średnicę zastępczą miały nasiona rzepaku (1,62–1,66 mm), a największą łubinu (6,36–6,47 mm). Najniższym współczynnikiem sferyczności cechował się owies (0,36–0,40), a największym rzepak (0,96–0,98). Największą gęstością usypową i utrzęsioną charakteryzował się łubin, a najmniejszą owies.

Tabela 1. Właściwości geometryczne i fizyczne nasion rzepaku, łubinu oraz ziaren owsa

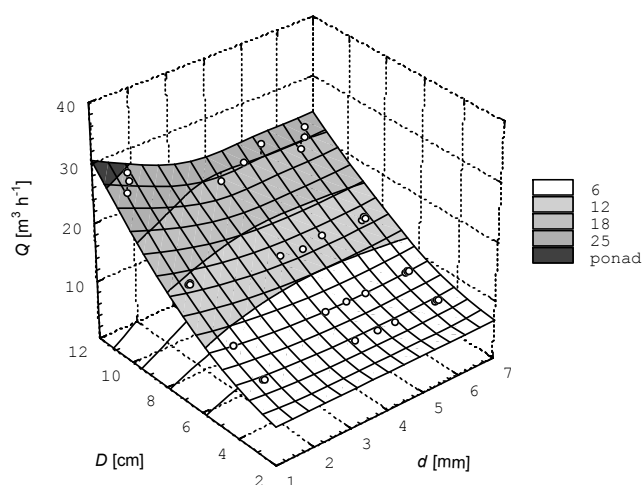
Table 1. Geometrical and physical proprieties of rapeseed, lupine and oats grain

Zawartość wody $\text{kg} \cdot (\text{kg s.m.})^{-1}$		d mm	sf	Masa 1000 nasion g	Gęstość $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		Kąt deg	
					usypowa	utrzęsiona	usypu	zsypu
Rzepak	0,089	1,62	0,96	3,505	0,632	0,655	29	26
	0,120	1,64	0,97	3,702	0,623	0,648	30	28
	0,145	1,66	0,98	4,085	0,619	0,635	31	32
Łubin	0,089	6,36	0,74	130,569	0,775	0,810	26	17
	0,120	6,44	0,76	135,064	0,754	0,789	27	17
	0,145	6,47	0,77	138,693	0,736	0,771	28	18
Owies	0,089	4,10	0,36	31,572	0,529	0,538	25	18
	0,120	4,72	0,37	32,688	0,490	0,523	26	22
	0,145	5,23	0,40	33,581	0,484	0,514	27	26



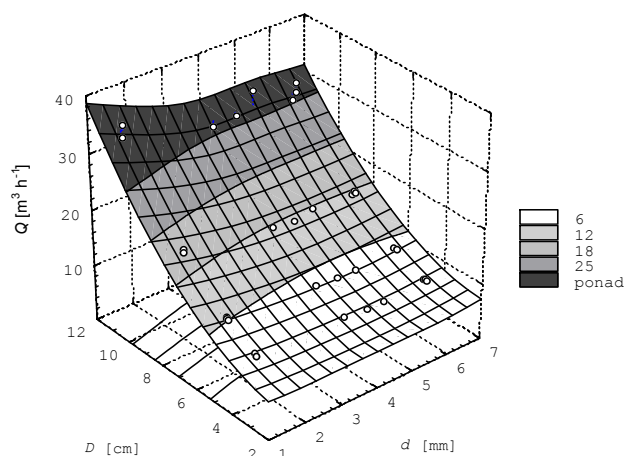
Rys. 1. Zależność natężenia przepływu ziarna przez otwór okrągły (umieszczony centrycznie) od średnicy otworu i średnicy zastępczej ziarna

Fig. 1. The relationship between flow rates of grain through circular orifice (situated in the center) from orifice diameter and substitute diameter of grain



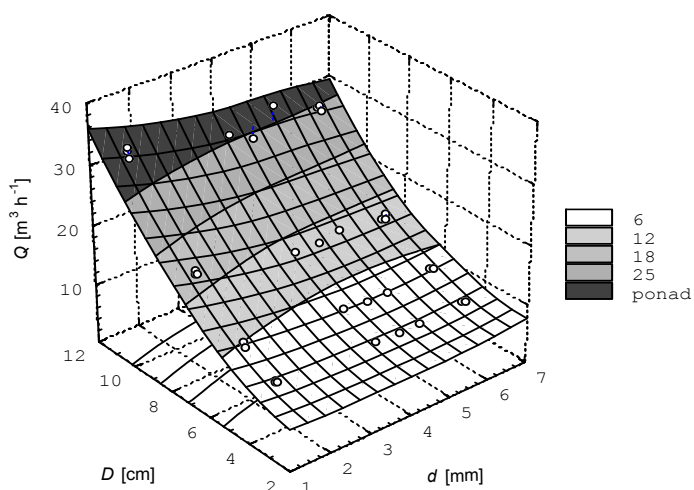
Rys. 2. Zależność natężenia przepływu ziarna przez otwór okrągły (umieszczony przy ścianie) od średnicy otworu i średnicy zastępczej ziarna

Fig. 2. The relationship between flow rates of grain through circular orifice (situated near wall) from orifice diameter and substitute diameter of grain



Rys. 3. Zależność natężenia przepływu ziarna przez otwór kwadratowy (umieszczony centrycznie) od średnicy równoważnej otworu i średnicy zastępczej ziarna

Fig. 3. The relationship between flow rates of grain through square orifice (situated in the center) from orifice diameter and substitute diameter of grain



Rys. 4. Zależność natężenia przepływu ziarna przez otwór kwadratowy (umieszczony przy ścianie) od średnicy otworu i średnicy zastępczej ziarna

Fig. 4. The relationship between flow rates of grain through square orifice (situated near wall) from orifice diameter and substitute diameter of grain

Wyniki pomiaru natężenia przepływu materiału w zależności od średnicy zastępczej przez otwory o różnym kształcie i rozmiarze, umieszczone centrycznie lub niecentrycznie, przedstawiono na rys. 1–4.

Większe wartości natężenia otrzymano podczas przepływu przez otwory kwadratowe niż okrągłe, co jest zgodne z danymi literaturowymi, z uwagi na większą powierzchnię otworów kwadratowych. Większe przepływy odpowiadały otworom centrycznym niż niecentrycznym.

Największe wartości natężenia przepływu ($30,86 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) otrzymano podczas przepływu nasion rzepaku o średnicy zastępczej $d = 1,62 \text{ mm}$ przez kwadratowy otwór centryczny o wymiarze $11,4 \text{ cm}$, a najmniejsze przy przepływie nasion łubinu ($1,06 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) o $d = 6,47 \text{ mm}$ przez okrągły otwór niecentryczny o średnicy 4 cm .

Uzyskane wyniki badań poddano analizie statystycznej programem Statistica 5.1. Analiza wariancji wykazała, że na natężenie przepływu wybranych nasion i ziaren istotny wpływ wywierają średnica zastępcza materiału, zawartość wody, średnica hydrauliczna otworu i położenie otworu.

Natomiast istotnego wpływu na uzyskane wyniki badań nie mają następujące właściwości fizyczne zastosowanych surowców: sferyczność, masa tysiąca nasion, gęstość usypowa i utrzesiona oraz kąt usypu i zsypu.

Z wyników przedstawionych na rysunkach 1–4 wynika, że na objętościowe natężenie przepływu bardzo duży wpływ wywiera średnica hydrauliczna otworu, o czym świadczy wysoka wartość współczynnika korelacji między tymi wartościami $r = 0,96 - 0,97$. Zwiększenie średnicy hydraulicznej otworu powoduje wzrost natężenia przepływu, co jest oczywiste. Natomiast wzrost średnicy zastępczej materiału powoduje spadek wartości objętościowego natężenia przepływu, co potwierdza ujemna wartość współczynnika korelacji ($r = -0,49 - -0,47$). Średnica zastępcza materiału wywiera znacznie mniejszy wpływ na wartości natężenia przepływu niż średnica hydrauliczna otworu.

Zastosowanie estymacji nieliniowej pozwoliło na dopasowanie funkcji matematycznych do rezultatów badań. Do analizy wybrano funkcję wykładniczą.

Wyprowadzono równania w formie zalecanej przez ASAE D274.1:

$$Q_{oc} = 0,086 \cdot A \cdot D^{0,38} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,985$$

$$Q_{on} = 0,0972 \cdot A \cdot D^{0,294} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,944$$

$$Q_{kc} = 0,071 \cdot A \cdot D^{0,479} \quad (5)$$

$$R^2 = 0,97$$

$$Q_{kn} = 0,0605 \cdot A \cdot D^{0,518} \quad (6)$$

$$R^2 = 0,968$$

gdzie: Q_{oc} – objętościowe natężenie przepływu przez okrągły otwór centryczny, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
 Q_{on} – objętościowe natężenie przepływu przez okrągły otwór niecentryczny, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
 Q_{kc} – objętościowe natężenie przepływu przez kwadratowy otwór centryczny, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,

Q_{kn} – objętościowe natężenie przepływu przez kwadratowy otwór niecentryczny,
 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
 A – powierzchnia otworu, cm^2 ,
 D – średnica hydrauliczna otworu, cm ,
 R^2 – współczynnik determinacji.

W ASAE D274.1 przykładowo podane są wartości współczynników C_o i n tylko dla kukurydzy, pszenicy, sorgo, rzepaku i lnu o określonych wilgotnościach. Wartości C_o wynoszą od 0,028 dla lnu do 0,092 dla sorgo. Wykładnik potęgi n mieści się w przedziale od 0,046 dla sorgo do 0,82 dla kukurydzy. Dla rzepaku o wilgotności od 6 do 12% $C_o = 0,055$, a $n = 0,70$. Natężenie przepływu pozostałych materiałów ziarnistych oblicza się zgodnie z bardzo ogólnie przedstawionymi zaleceniami.

Wyniki eksperymentalne otrzymane dla wybranych gatunków mają mniejsze wartości od normatywnych. Może to być związane z właściwościami fizycznymi. Dlatego postanowiono wyprowadzić dodatkowe równania, uwzględniające wpływ średnicy zastępczej ziarna na natężenie przepływu, na którą istotnie wpływa zawartość wody. Są one następujące:

$$Q_{oc} = 0,175 \cdot A \cdot D^{\frac{0,234}{d}} \quad (7)$$

$$R^2=0,976$$

$$Q_{on} = 0,156 \cdot A \cdot D^{\frac{0,266}{d}} \quad (8)$$

$$R^2=0,975$$

$$Q_{kc} = 0,181 \cdot A \cdot D^{\frac{0,229}{d}} \quad (9)$$

$$R^2=0,978$$

$$Q_{kn} = 0,236 \cdot A \cdot D^{\frac{0,231}{d}} \quad (10)$$

$$R^2=0,977$$

gdzie: d – średnica zastępcza materiału, mm .

Wszystkie wyprowadzone równania cechują się bardzo wysokimi współczynnikami determinacji. Za najbardziej odpowiednie równania, uwzględniające zarówno czynniki wywierające istotny wpływ na natężenie przepływu wybranego materiału ziarnistego, jak i zalecenia normatywne, należy przyjąć zależności (7), (8), (9) i (10).

WNIOSKI

1. Właściwości fizyczne nasion i ziaren zależą od poziomu zawartości wody. Wraz ze wzrostem zawartości wody rośnie wartość kąta usypu i zsypu, wzrasta także masa 1000 nasion, średnica równoważna oraz sferyczność nasion, maleje zaś wartość gęstości utręzionej i usypowej.

2. Na objętościowe natężenie przepływu materiału roślinnego wpływają istotnie: średnica hydrauliczna otworu, średnica zastępcza materiału, zawartość wody oraz położenie otworu. Większe natężenia przepływu uzyskano dla otworów położonych centrycznie niż niecentrycznie.
3. Natężenie przepływu wybranych surowców można opisać z dużą dokładnością w zależności od pola powierzchni otworu, średnicy hydraulicznej otworu oraz średnicy zastępczej materiału. Wartości natężenia przepływu rosną wraz ze zwiększeniem średnicy hydraulicznej otworu i maleją wraz ze wzrostem średnicy zastępczej materiału.

PIŚMIENNICTWO

1. **ASAE D274.1, 1993:** Flow of grain and seeds through orifices. ASAE Standards.
2. **Beverloo W.A., Leniger H.A., Van de Velde J., 1961:** The flow of granular solids through orifices. Chem. Eng. Sci., 15, 260-269.
3. **Brown R.L., Richards J.C., 1960:** Profile of flow of granules through apertures. Trans. Inst. Chem. Eng., 38, 243-256.
4. **Chang S.C., Converse H.H., 1988:** Flow rates of wheat and sorghum through horizontal orifices. Trans. of ASAE, 31(1), 300-304.
5. **Chang C.S., Converse H.H., Lai F.S., 1984:** Flow rate of corn through orifices as affected by moisture content. Trans. of ASAE, 27(5), 1586-1589.
6. **Ewalt D.J., Buelow F.H., 1963:** Flow of shelled corn through orifices in bin wall. Mich. Agr. Expt. Sta. Quart. Bul., 46, 92-102.
7. **Feda J., 1977:** Zaklady mechaniky partikularnych latek. Academia, Praha.
8. **Fowler R.T., Glastonbury J.R., 1959:** The flow of granular solids through orifices. Chem. Eng. Sci., 10, 150-156.
9. **Gregory J.M., Fedler C.B., 1987:** Equation describing granular flow through circular orifices. Trans. of ASAE, 30(2), 529-532.
10. **Horabik J., 2001:** Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesach składowania. Acta Agrophysica, 54.
11. **Kusińska E., Olejarczyk P., 2003a:** Natężenie przepływu nasion łubinu przez otwory. Inżynieria Rolnicza, 7(49), 77-84.
12. **Kusińska E., Olejarczyk P., 2003b:** Wpływ parametrów geometrycznych otworów na natężenie przepływu nasion rzepaku. Acta Agrophysica, 83, 119-129.
13. **Molenda M., 1998:** Wpływ struktury złoża nasion na stan naprężenia. Acta Agrophysica, 12.
14. **Moysey E. B., Lambert E. W., Wang J., 1988:** Flow rates of grains and oilseeds through sharp-edged orifices. Trans. of ASAE, 31(1), 226-231.
15. **Schwedes J., 1985:** Influence of wall friction on silo design in process and structural engineering. German Chem. Eng., 3, 132-138.
16. **Wilms H., 1977:** The rate of discharge of coarse granular materials from conical mass flow hoppers. Chem. Eng. Sci., 32, 247-255.

INFLUENCE CAUSED BY ORIFICES OF GEOMETRICAL PARAMETERS AND
EQUIVALENT DIAMETER OF VEGETABLE MATERIAL ON VOLUME FLOW RATE

Summary. This paper presents results flow rates of vegetable material at various moisture content, in depends on hydraulic diameter of orifices and substitute diameter chosen seeds and grains. The vegetable material exemplify lupine and rape seeds and oats grain. The orifices were characterized by various shape, size and position. Moisture content was amounted from 0.089 kg·(kg d.b.)⁻¹ to 0.145 kg·(kg d.b.)⁻¹ in research materials. Size of hydraulic diameter of orifices were amounted from 4.0 to 11.4 cm and size of substitute diameter of material from 1.62 to 6.47 mm. The research of rates flow curried out on a laboratory scale. Obtain results put on the test statistical analysis which proved essential influence of shape, position, hydraulic diameter of orifices and substitute diameter of material on results measured flow rates.

Key words: grain, flow rate, moisture content, hydraulic diameter of orifices, substitute diameter of material.

Recenzent: prof. dr hab. Andrzej Roszkowski