

ANALIZA PROCESU PRZESIEWANIA W APARACIE BĘBNOWYM Z LISTWAMI ZABURZAJĄCYMI

Karolina Skoczowska¹, Krystian Malek¹, Roman Ulbrich¹

¹ Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, ul. St. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, e-mail: k.skoczowska@doktorant.po.edu.pl; krystian.malek@onet.eu; r.ulbrich@po.opole.pl

STRESZCZENIE

Celem pracy jest określenie wpływu listew zaburzających na proces przesiewania w aparatach bębnowych. Badania modelowe przeprowadzono w obrotowym bębnie o średnicy 700 mm dla trzech przypadków: bębna bez listew, z pojedynczą listwą oraz z czterema listwami. Wypełnienie stanowiło złożę ziarniste składające się z ziaren peluszek, w zakresie stopnia wypełnienia bębna od 15% do 35%. W celu określenia ruchu cząstek zastosowano kamerę CMOS wraz z komputerem zaopatrzonym w program do analizy ruchu cząstek PIV.

Słowa kluczowe: przesiewacz, aparat bębnowy, listwy zaburzające, PIV.

SCREENING PROCESS IN ROTATING DRUM WITH DISRUPTING FLIGHTS

ABSTRACT

The aim of this research was to determine the influence of disrupting flights on the screening in rotating drum. The study was carried out for drum with diameters of 700 mm and for three cases: empty drum, drum with one and four flights. The bed consist field pea grain with range of fill-in-degree from 15% to 35%. In order to determine the particle movement fast-speed camera with PIV application was used.

Keywords: screens, rotating drum, disrupting flights, PIV.

WPROWADZENIE

Przesiewanie materiałów ziarnistych ma istotne znaczenie w przemyśle rolnym, spożywczym, gospodarowania odpadami, a także mineralnym. Proces ten polega na oddzieleniu od siebie cząstek o różnej średnicy, dzięki kontaktowi ziaren z sitem. Przesiewacze bębnowe mają prostą budowę i zasadę działania – obracający się bęben powoduje ruch jego wypełnienia, a tym samym kontakt sita z przesuwanym się na jego obwodzie cząstkami (rys. 1). W przesiewaczach bębnowych wykorzystuje się zwykle jedynie 20% powierzchni czynnej sita, co znacznie obniża wydajność aparatu. Średnica przesiewaczy stosowanych w przemyśle wynosi od 500 mm do 3000 mm [Modrzewski, Wodziński 2013; Wodziński 2007]

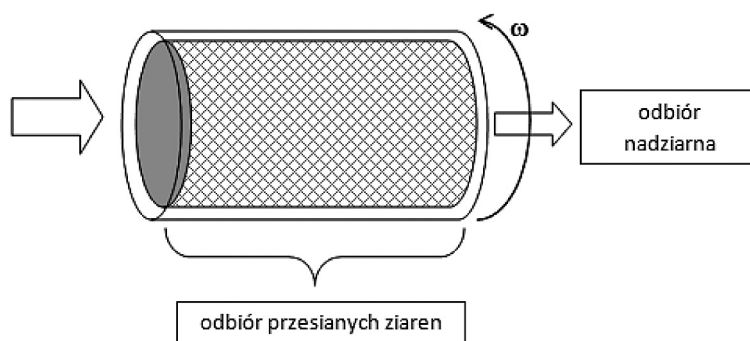
W zależności od prędkości obrotowej przesiewacza wypełnienie ulegać może procesom: falowania, toczenia, kaskadowania, kataraktowania oraz wirowania (rys. 2). Proces falowania zachodzi

przy niskich prędkościach obrotowych i małym stopniu wypełnienia bębna (rys. 2a). Toczenie rozpoczyna się w momencie, gdy materiał stanowiący wypełnienia osiągnie tzw. kąt zsypu (rys. 2b). Kaskadowanie jest procesem, podczas którego formuje się tzw. “nerka”, w której zewnętrzna część cyrkuluje, natomiast rdzeń jest nieruchomy (rys. 2c). Podczas kataraktowania cząstki swobodnie opadają (rys. 2d). Przy wysokich prędkościach obrotowych wypełnienie wiruje wraz z bębniem (rys. 2e) [Chou, Hsiau 2012; Liu, Ai 2011].

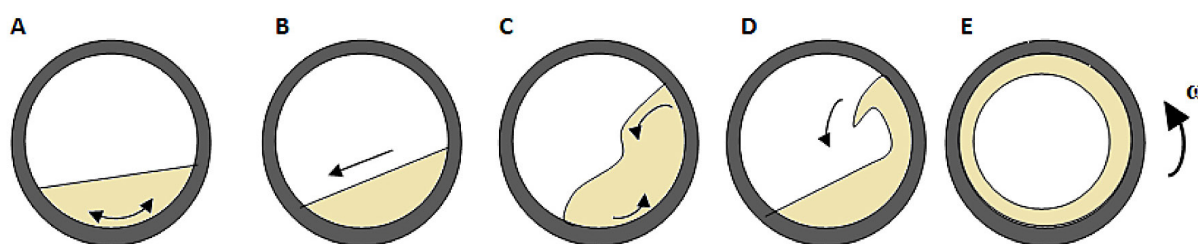
W aparatach bębnowych wprowadzono pojęcie prędkości krytycznej, która określa moment zrównoważenia się siły odśrodkowej i grawitacji. Dla pojedynczej cząstki daną prędkość wyliczyć można ze wzoru (1) lub (2):

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R}} \text{ [rad}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (1)$$

$$n_{kr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \text{ [obr}\cdot\text{min}^{-1}] \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat działania przesiewacza bębnowego
Fig. 1. The scheme of drum screen



Rys. 2. Procesy zachodzące w przesiewaczach bębnowych: A) falowanie, B) toczenie, C) kaskadowanie,
D) kataraktowanie, E) wirowanie

Fig. 2. The characteristic processes in rotating screens: A) slipping, B) rolling, C) cascading,
D) cataracting, E) centrifuging

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$],
 R – promień przesiewacza [m],
 D – średnica przesiewacza [m].

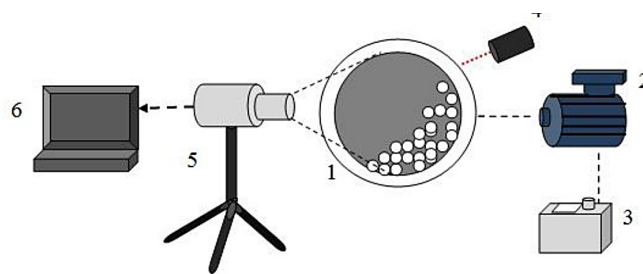
Zakres prędkości pracy przesiewaczy bębnowych wynosi do ok. 30% prędkości krytycznej, co odpowiada procesowi toczenia lub kaskadowania wypełnienia. Podczas tych procesów część ziaren nie kontaktuje się z siateczką, co spowalnia proces przesiewania i zmniejsza jego skuteczność. Aby proces przesiewania zachodził z wyższą intensywnością należy złoże doprowadzić do kataraktowania tak, aby ziarna ulegały zmieszaniu i rozluźnieniu. Według Wodzińskiego prędkość obrotowa powinna więc wahać się w zakresie od 80% do 90% prędkości krytycznej. Innym sposobem zwiększenia wydajności przesiewaczy bębnowych jest zastosowanie listew zaburzających, których zadaniem jest wyniesienie ziaren na pewną wysokość i doprowadzenie do mieszania wypełnienia. [Feder 2008; Wodziński 2007].

METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym (rys. 3), którego głównym elementem

jest transparentny, obrotowy bęben o średnicy 700 mm i szerokości 30 mm. Ruch obrotowy bębna wywołany jest poprzez silnik indukcyjny, którego praca kontrolowana jest przez falownik. Prędkość obrotowa określana jest dzięki tachometrowi optycznemu. W celu rejestracji zachowania się wypełnienia podczas pracy bębna zastosowano szybką, monochromatyczną kamerę CMOS o wysokiej rozdzielczości. Materiałem stanowiącym wypełnienie były ziarna peluszek o gęstości nasypowej $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ oraz średnicy zastępczej równej 6 mm.

Na podstawie zarejestrowanych map bitowych w programie DPIV (z ang. Digital Particle Image Velocimetry) wyznaczono trajektorie ruchu cząstek oraz ich rozkład pola prędkości, dzięki czemu możliwe było określenie zachowania się wypełnienia przy danej prędkości obrotowej. Program PIV umożliwia wyznaczenie drogi przesunięcia się obiektu na podstawie zmian poziomu szarości zarejestrowanych po sobie obrazów. Program na podstawie czasu pomiędzy kolejno po sobie rejestrowanymi mapami bitowymi i odpowiedniej korelacji wyznacza wektory prędkości przesunięcia się obiektów (cząstek lub grup cząstek w złożu). [Ligus, Ignasiak 2010; Suchecki i in. 2003; Ulbrich i in. 2002]



- 1- obrotowy, transparentny bęben
- 2- silnik indukcyjny
- 3 - falownik
- 4 - tachometr optyczny
- 5 - szybka, monochromatyczna kamera
- 6 - komputer z oprogramowaniem DPIV

Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego
 Fig. 3. The scheme of test stand

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

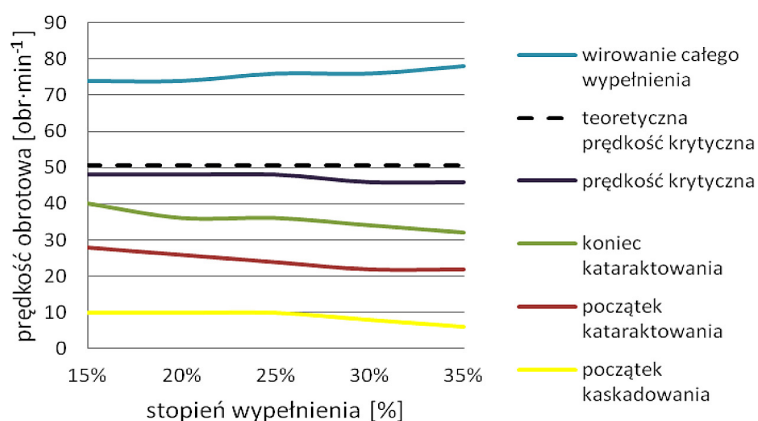
Analiza badań pozwoliła na określenie charakterystycznych momentów i odpowiadających im prędkości obrotowych dla bębna bez listwy zaburzającej (rys. 4). Na rysunku 5 przedstawiono wektory prędkości ziaren podczas charakterystycznych momentów zachowania się wypełnienia. Prędkości obrotowe dla momentów charakterystycznych, z wyłączeniem wirowania całego złoża, malały wraz ze wzrostem wypełnienia bębna. Teoretyczna prędkość obrotowa obliczona ze wzoru (2) wynosi 50,6 obr·min⁻¹. Różnica

między obliczeniową, a zbadaną prędkością krytyczną wynosi 2,6 obr·min⁻¹ dla stopnia wypełnienia bębna od 15% do 25% oraz 4,6 obr·min⁻¹ dla większego stopnia wypełnienia. Proces kataraktowania zachodził w zakresie od 43% do 79% prędkości krytycznej (tab. 1), co znacznie przekracza stosowany w przemyśle współczynnik 30%, który odpowiada obszarowi kaskadowania złoża. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna stosunek zbadanej i obliczonej prędkości obrotowej maleje.

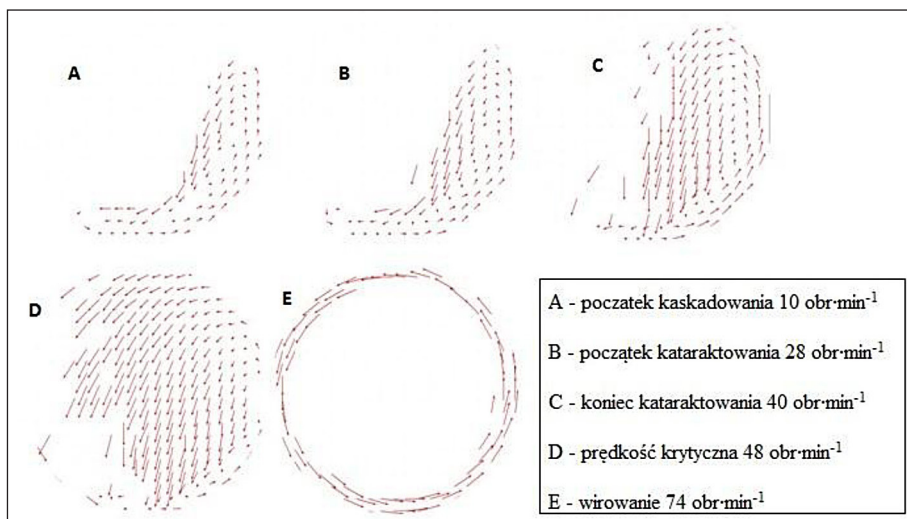
Listwy zaburzające powodowały wynoszenie się ziaren i rozluźnienie złoża, niezależnie

Tabela 1. Stosunek zbadanej i obliczonej prędkości obrotowej dla różnych stopni wypełnienia przesiewacza
 Table 1. The ratio of tested and calculated velocity for various fill-in-degree of the screen

Moment charakterystyczny	Stopień wypełnienia bębna				
	15%	20%	25%	30%	35%
Początek kataraktowania	0,55	0,51	0,47	0,43	0,43
Koniec kataraktowania	0,79	0,71	0,71	0,67	0,63



Rys. 4. Wykres momentów charakterystycznych zachodzących w przesiewaczu bez listw zaburzających
 Fig. 4. The graph of characteristics moments in rotating screens without flights



Rys. 5. Wektory prędkości dla momentów charakterystycznych dla 15% stopnia wypełnienia
 Rys. 5. Velocity vectors of characteristics moments for 15% fill-in-degree

Prędkość obrotowa	Widok ruchu wypełnienia	Prędkość obrotowa	Widok ruchu wypełnienia	Prędkość obrotowa	Widok ruchu wypełnienia	Prędkość obrotowa	Widok ruchu wypełnienia
10 obr·min ⁻¹		20 obr·min ⁻¹		30 obr·min ⁻¹		40 obr·min ⁻¹	
50 obr·min ⁻¹		60 obr·min ⁻¹		70 obr·min ⁻¹		80 obr·min ⁻¹	

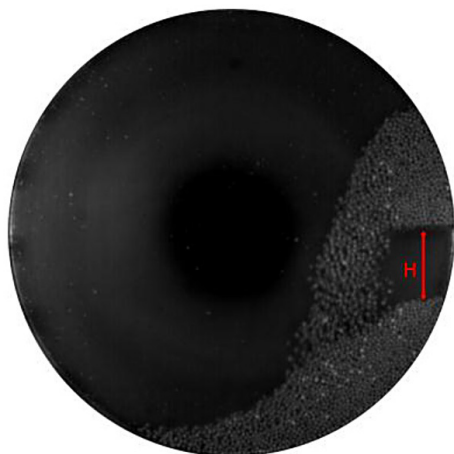
Rys. 6. Widok ruchu złoża dla przesiewacza wyposażonego w pojedynczą listwę dla 15% stopnia wypełnienia bębna
 Fig. 6. The view of bed motion for screen with one flight for 15% fill-in-degree

Prędkość obrotowa	Widok ruchu wypełnienia	Prędkość obrotowa	Widok ruchu wypełnienia	Prędkość obrotowa	Widok ruchu wypełnienia	Prędkość obrotowa	Widok ruchu wypełnienia
10 obr·min ⁻¹		20 obr·min ⁻¹		30 obr·min ⁻¹		40 obr·min ⁻¹	
50 obr·min ⁻¹		60 obr·min ⁻¹		70 obr·min ⁻¹		80 obr·min ⁻¹	

Rys. 7. Widok ruchu złoża dla przesiewacza wyposażonego z czterema listwami przy 15% stopniu wypełnienia bębna
 Fig. 7. The view of bed motion for screen with four flights for 15% fill-in-degree

Tabela 2. Wysokość wolnej przestrzeni pomiędzy listwą, a złożem**Table 2.** The height of empty space between flight and bed

Stopień wypełnienia bębna	Prędkości obrotowe			
	10 obr·min ⁻¹	20 obr·min ⁻¹	30 obr·min ⁻¹	40 obr·min ⁻¹
15%	38 mm	108 mm	173 mm	168 mm
20%	0 mm	63 mm	110 mm	123 mm
25%	11 mm	12 mm	68 mm	79 mm
30%	0 mm	0 mm	31 mm	58 mm
35%	0 mm			

**Rys. 8.** Widok wolnej przestrzeni pomiędzy listwą, a wypełnieniem**Fig. 8.** The view of empty space between flight and bed

od prędkości obrotowej bębna, co potwierdza pozytywny wpływ tych elementów na proces przesiewania. Na rysunku 6 i 7 przedstawiono wpływ jednej oraz czterech listew na zachowanie się złoża przy 15% stopniu wypełnienia bębna.

Zarówno dla pojedynczej jak i czterech listew zaburzających optymalna prędkość obrotowa wynosiła od 10 obr·min⁻¹ do 20 obr·min⁻¹. Dla pracy bębna bez elementów zaburzających kataraktowanie zachodziło w zakresie od 22 obr·min⁻¹ do 40 obr·min⁻¹, w zależności od stopnia wypełnienia bębna. Oznacza to, że optymalna prędkość obrotowa dla procesu przesiewania może zostać znacznie zredukowana poprzez zastosowanie listew. Proces mieszania się ziaren zachodzi z wyższą intensywnością przy zastosowaniu czterech listew. Dla pojedynczego elementu zaburzającego powyżej 30 obr/min, ziarna zostają wyniesione poza złożę, co odpowiada momentowi zakończenia kataraktowania. Przy tej samej prędkości obrotowej dla przesiewacza bębnowego wyposażonego w cztery listwy, zauważono że cząstki opadają na elementy zaburzające, co może spo-

wodować rozpad ziaren, a tym samym mieć niekorzystny wpływ na produkt końcowy.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Stosowana w przemyśle prędkość obrotowa jest zbyt mała, aby proces przesiewania zachodził z odpowiednią intensywnością.
2. Należy doprowadzić złożę do kataraktowania w celu zmieszania i rozluźnienia wypełnienia.
3. Prędkości obrotowe odpowiadające kaskadowaniu, kataraktowaniu oraz wirowaniu pojedynczych cząstek malały wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna, odwrotnie dla wirowania całego złoża.
3. Zadaniem listew jest wyniesienie na pewną wysokość części wypełnienia, a tym samym wymieszanie i rozluźnienie złoża.
4. Zastosowanie listew pozytywnie wpływa na energochłonność procesu przesiewania, poprzez znaczne zmniejszenie optymalnej prędkości obrotowej.
5. Wysokość wolnej przestrzeni tworzącej się pomiędzy listwą, a złożem w czasie pracy aparatu malała wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna; w czasie zwiększania prędkości obrotowej przestrzeń ta również ulegała zwiększeniu.

LITERATURA

1. Chou S.H., Hsiao S.S. 2012. Dynamic properties of immersed granular matter in different flow regimes in a rotating drum. *Powder Technology*, 226, 99–106.
2. Feder S., Kęska W., Włodarczyk K. 2008. Pneumatyczne wspomaganie procesu przesiewania mieszanin ziarnistych na przesiewaczu płaskim. *Inżynieria Rolnicza*, 4 (102), 263–270.

3. Hart D.P. 1999. Super-resolution PIV by recursive local-correlation. *Journal of Visualization, The Visualization Society of Japan*, 10, 1–10.
4. Ligus G., Ignasiak K. 2010. Wykorzystanie cyfrowej anemometrii obrazowej do analizy segregacji cząstek monodispersyjnych pod kątem zastosowań w gospodarce odpadami. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Warszawa*, nr 6, Opole, 104–113.
5. Liu K.F., Al Y.A. 2011. Flow patterns for muddy material in a rotating drum. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment - Book*, 359–365.
6. Modrzewski R., Wodziński P. 2013. Koncepcja przesiewaczy bębnowo-stożkowych o zróżnicowanych średnicach sit do przesiewania kruszyw. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 136. Studia i Materiały*, nr 43. Wrocław, 131–140.
7. Suchecki W., Alabrudziński S., Kowalewski T. 2003, Metoda analizy pola prędkości z uwzględnieniem istnienia dużych obiektów w przepływie. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 5, 6–13.
8. Ulbrich R., Krótkiewicz M., Szmolke N., Anweiler S., Masiukiewicz M., Zając D. 2002. Recognition of twophase flow patterns with the use of dynamic image analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E. Journal of Process Mechanical Engineering*, 216, 227–233.
9. Wodziński P. 2007. Przesiewanie kruszyw w przesiewaczach bębnowych. *Surowce i maszyny budowlane*, 1, 54–57.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



„Stypendia doktoranckie – inwestycja w kadre naukową województwa opolskiego”.

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



Opublikowanie pracy dofinansowano ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Lublinie.