

Karolina SKOCZKOWSKA, Krystian MALEK, Roman ULBRICH

e-mail: k.skoczowska@doktorant.po.edu.pl

Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

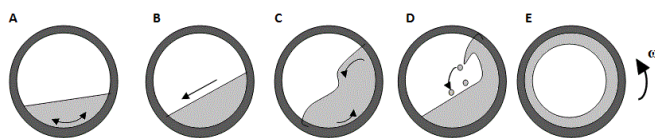
Ruch cząstki w złożu monodispersyjnym w aparacie bębnowym

Wstęp

Aparaty bębnowe dzięki swojej prostej budowie i zasadzie działania od wielu lat stosowane są w przemyśle w procesach takich jak: mieszanie, mielenie, przesiewanie, granulowanie czy suszenie materiałów ziarnistych. W zależności od procesu w jakim stosuje się tego typu urządzenie odpowiedni ruch złoża jest różny. Najczęściej są to urządzenia poziome lub pochylone pod niewielkim kątem do osi poziomej, co umożliwia odbiór ziaren. Stopień wypełnienia bębnowy zmienia się w granicy od 10 do 50% [Heim i in., 1999.; Hema, 2003].

Złoże ziarniste to zbiór cząstek stałych o ograniczonej powierzchni, które oddziałują na siebie w punktach styku. Materiały ziarniste cechuje zdolność do płynięcia, co wyróżnia się poprzez współczynnik tarcia różny od zera, dodatkowo ziarna mogą przenosić naprężenia ścinające. [Stręk, 1971; Hema, 2003]. W przypadku ziaren o cząstkach kulistych, parametrami określającymi charakterystykę złoża są m.in.: gęstość nasypowa, porowatość, średnica ziaren, współczynnik tarcia oraz jego wilgotność [Boss, 1987].

Ruch złoża zależy m.in. od parametrów takich jak: prędkość obrotowa i stopień wypełnienia bębna, a także od chropowatości powierzchni ziaren jak i samego bębna. Przy niewielkim stopniu wypełnienia bębna i niskich prędkościach obrotowych złoże ulega jedynie falowaniu (Rys. 1a). Następnie po osiągnięciu tzw. kąta zsypania złoże ulega toczeniu (Rys. 1b). Kolejnym stanem charakterystycznym dla złoża ziarnistego w aparacie bębnowym jest kaskadowanie - zewnętrzna część złoża cyrkuluje, natomiast wewnętrzna jest w stagnacji (Rys. 1c). Gdy cząstki rozpoczynają autonomiczny ruch po oderwaniu się od złoża rozpoczyna się tzw. kataraktowanie (Rys. 1d). Ostatnim charakterystycznym ruchem jest wirowanie (Rys. 1e). [Henein i in., 1983; Heim i in., 1999; Hema, 2003].



Rys. 1. Charakterystyczne stany ruchu złoża w aparacie bębnowym [Henein i in., 1983]

Niektóre charakterystyczne prędkości obrotowe można obliczyć ze wzoru *Oyama*:

$$n_{ch} \equiv \frac{C}{D^{0,47} \cdot \varphi^{0,14}}, \quad (1)$$

a prędkość krytyczną (dla wirowania pojedynczej cząstki) ze wzoru:

$$n_{kr} \equiv \frac{42,3}{\sqrt{D}}, \quad (2)$$

C – Stała określająca prędkość charakterystyczną, [-]:

C = 54 dla początku kataraktowania

C = 72 dla końca kataraktowania

C ≥ 86 dla wirowania całego złoża

D – średnica aparatu bębnowego, [m]

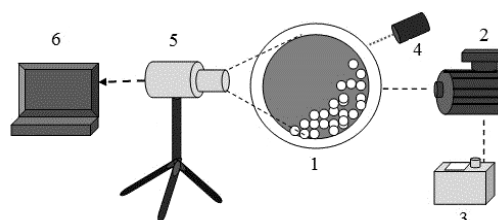
φ – stopień wypełnienia aparatu bębnowego, [%]

Opisane w pracy badania miały na celu określenie ruchu wybranych, pojedynczych cząstek w złożu ziarnistym w czasie obrotów aparatu bębnowego.

Badania doświadczalne

Zakres badań. Badano ruch pojedynczej cząstki przy 25% stopniu wypełnienia bębna oraz dla wybranych trzech prędkości obrotowych: 20, 40 oraz 60 obr/min.

Stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rys. 2, składało się z obrotowego transparentnego bębna, którego tylna część została pokryta czarną farbą oraz stanowiska komputerowego. Średnica bębna wynosiła 700 mm, natomiast jego szerokość 30 mm. Bęben obracał się dzięki silnikowi indukcyjnemu, którego prędkość obrotowa regulowana była poprzez falownik. Prędkość z jaką obracał się bęben określano metodą optyczną przy użyciu tachometru optycznego.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1 - obrotowy, transparentny bęben, 2 - silnik indukcyjny, 3 - falownik, 4 - tachometr optyczny, 5 - szybka, monochromatyczna kamera, 6 - komputer z oprogramowaniem DPIV

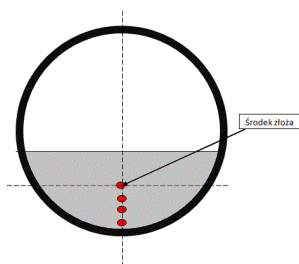
Materiał. Złoże stanowiły wykonane ze szkła, transparentne cząstki o średnicy 8 mm i tolerancji ± 0,4, których parametry fizykochemiczne przedstawiono w tab. 1. Wybrane cząstki zostały pokryte kolorową emalią, dzięki czemu możliwe było określenie ich położenia na zarejestrowanych obrazach.

Metodyka. Do rejestracji ruchu cząstek zastosowano szybką kamerę cyfrową CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) oraz program DPIV (*Digital Particle Image Velocimetry*), który umożliwił określenie trajektorii ruchu cząstek na podstawie zarejestrowanych map bitowych przy znanym czasie pomiędzy klatkami otrzymywanych z kamery obrazów. Do dalszej obróbki obrazów zastosowano program *Photo Scape* oraz *AUTOCAD*.

Tab. 1. Parametry cząstek złoża wg [Interchemia, 2015]

Parametr	Wartość	
Gęstość, [kg/m ³]	2500	
Twardość wg <i>Mohsa</i>	≥ 6	
Współczynnik kulistości	≥ 95	
Sposób produkcji	Prasowanie	
Skład chemiczny, [%]	SiO ₂	66,7
	Na ₂ O	14,0
	CaO	7,6
	B ₂ O ₃	2,9
	PbO	< 0,01
	B ₂ O ₃	2,9

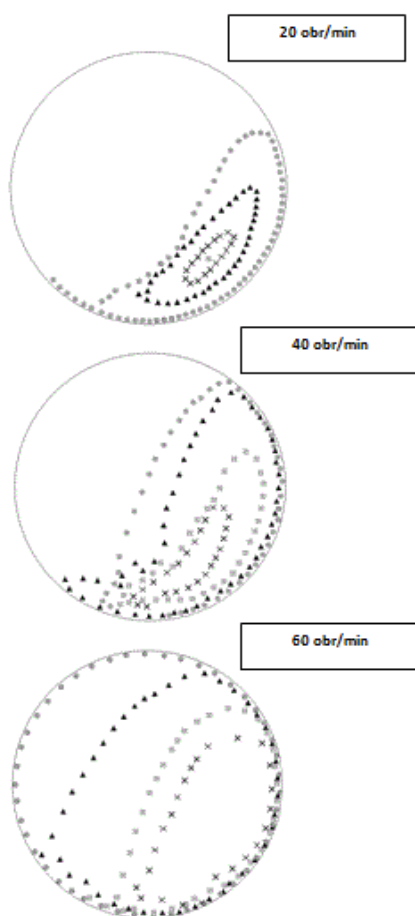
Badania przeprowadzono dla czterech początkowych położenia cząstek – w różnej odległości od środka złoża (Rys. 3).



Rys. 3. Schemat ułożenia początkowego cząstek znacznikowych

Wyniki i ich analiza

Na rys. 4 przedstawiono trajektorie ruchu czterech znacznikowych cząstek w złoże przy trzech prędkościach obrotowych bębna.



Rys. 4. Trajektorie ruchu cząstek dla trzech prędkości obrotowych bębna

W tab. 2 zestawiono zaobserwowane prędkości charakterystyczne dla ruchu złoże oraz obliczone wg zależności (1) i (2).

Przy prędkości obrotowej równej 20 obr/min zachodziło kaskadowanie. Podczas tego ruchu tworzyła się tzw. nerka, w środku której rdzeń był nieruchomy, natomiast zewnętrzne cząstki ulegały cyrkulacji.

Dla prędkości 40 obr/min zauważalny był ruch kataraktowy, gdy wyniesione cząstki wykonywały swobodne opadanie na złoże. Pomimo, iż cząstki wewnętrzne nie ulegały wyraźnemu oderwaniu się od złoże podczas pojedynczego cyklu, zauważalne było mieszanie się cząstek w dolnej powierzchni złoże, a tym samym możliwe było ich kataraktowanie w kolejnych obrotach bębna.

Podczas obrotów bębna z prędkością 60 obr/min widoczne było wirowanie pojedynczych cząstek oraz ich mieszanie w dolnej strefie bębna.

Tab. 2. Prędkości charakterystyczne dla ruchu złoże

Stany charakterystyczne	Prędkość obrotowa, [obr/min]	
	zaobserwowana	obliczeniowa
Falowanie	Nie zaobserwowano	-
Toczenie	1	-
Początek kaskadowania	18	-
Początek kataraktowania	28	40,7
Koniec kataraktowania	44	54,3
Wirowanie pojedynczej cząstki	54	50,6
Wirowanie całego złoże	84	64,8

Największa różnica (ok. 30%) między wynikami otrzymanymi na podstawie obliczeń i zaobserwowanymi w trakcie badań występuje dla początku kataraktowania oraz wirowania całego złoże. Najbardziej zbliżone są wyniki (różnica 7%) dla prędkości charakterystycznej, odpowiadającej wirowaniu pojedynczej cząstki.

Podsumowanie i wnioski

W trakcie badań określono prędkości początkowe/koncowe dla charakterystycznych zachowań się złoże opisywanych w literaturze związanej z tematyką aparatów bębnowych.

Wyniki eksperymentalne zostały poddane analizie wraz z wynikami otrzymanymi na podstawie obliczeń prędkości charakterystycznych dla obracających się aparatów bębnowych. Zauważono dużą rozbieżność (30%) w przypadku początku ruchu kataraktowania oraz wirowania całego złoże. Wskazuje to na potrzebę dalszych badań nad tego typu urządzeniami oraz możliwych modyfikacji przytoczonych w artykule wzorów.

Trajektoria ruchu cząstek przy prędkości obrotowej bębna równej 20 obr/min wskazała na brak mieszania się cząstek. Przy 40 obr/min zewnętrzne cząstki ulegały swobodnemu spadkowi, jednak zauważalna była strefa mieszania się cząstek w dolnej części złoże. Podczas pracy aparatu bębnowego z prędkością 60 obr/min widocznie zauważalne było wirowanie cząstek po obwodzie bębna.

Określenie trajektorii ruchu cząstek o różnym położeniu początkowym może być pomocne w zrozumieniu procesów zachodzących podczas pracy aparatów bębnowych.

LITERATURA

- Boss J., (1987). *Mieszanie materiałów ziarnistych*. PWN, Warszawa-Wrocław
- Heim A., Gluba T., Obraniak A., (1999). *Badanie momentu obrotowego podczas granulacji bębnowej* [w:] Sadowski Z. (red.) *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii (Materiały XXXVI Seminarium)*, Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław, 49-62 (ISBN: 8370854257)
- Henein H., Brimacombe J.K., Watkinson A.P., (1983). Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. *Metall. Trans.*, 14B, 191-205. DOI: 10.1007/BF02661016
- Stręć F., 1971. *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa
- Hema V. 2003. Mathematical modelling of the dynamics of granular materials in a rotating drum. Ph.D. Thesis. The Cochin University of Science and Technology, Regional Research Laboratory (CSIR), Thiruvananthapuram, India (10.2015) <http://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/bitstream/handle/purl/2381/Dyuthi-T0653.pdf?sequence=1>
- Interchemia, (2015). *Kulki szklane i ceramiczne do mielenia oraz innych zastosowań przemysłowych i dekoracyjnych.. Specyfikacja: Kulki szklane prasowane - dane udostępnione przez Biuro Handlu Zagranicznego Interchemia, Sosnowiec*

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓŁNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

