

ANALIZA ZACHOWANIA SIĘ ZŁOŻA W APARATACH BĘBNOWYCH

Krystian Malek¹, Karolina Skoczowska¹, Roman Ulbrich¹

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

STRESZCZENIE

Aparaty bębnowe mają zastosowanie do rozdrabniania, suszenia, mieszania, przesiewania, granulacji oraz w innych procesach technologicznych inżynierii środowiska. W zależności od rodzaju prowadzonego procesu mogą być wyposażone w dodatkowe oprzyrządowanie wspomagające zachodzące procesy. W pracy określono wpływ chropowatości wykładzin bębnowych na zachowanie się wypełnienia podczas pracy aparatu bębnowego. W tym celu zastosowano 3 rodzaje wykładzin o ziarnistości 40, 80 i 120. W eksperymencie zastosowano metodykę sekwencyjnej analizy obrazów z wykorzystaniem oprogramowania PIV. Wyniki obliczeń teoretycznych i prac eksperymentalnych wykazały duże rozbieżności (wynoszące ok. 46%) charakterystycznych prędkości obrotowych dla prędkości minimalnej bębna, oraz mniejsze (wynoszące ok. 5%) dla prędkości krytycznej. W przypadku zmiany ziarnistości wykładziny bębna nie odnotowano znacznych różnic w zachowaniu się wypełnienia.

Słowa kluczowe: aparaty bębnowe, PIV, dynamika procesów mieszania, prędkość obrotowa.

ANALYSIS OF DEPOSIT MAINTENANCE IN ROTATING DRUMS

ABSTRACT

Rotating drums are used to grinding, drying, mixing, screening, granulating and other processes in environmental engineering. Depending on the nature of the process they can be equipped with additional devices to support the processes. In this work, the effect of drum surface roughness on the behaviour of the feed during drumming. For this purpose, three types of bottom coverings with grain size of 40, 80 and 120 were used. In the experiment the methodology of sequential image analysis using PIV software was applied. The results of theoretical calculations and experimental works have shown significant discrepancies (of approx. 46%) of speed characteristics for the minimum speed of the drum and smaller (amounting to approx. 5%) for the critical speed. In case of change in the particle size of the drum coverings, there were no significant differences in the behaviour of the feed.

Keywords: rotating drum, PIV, dynamics of mixing processes, velocity.

WPROWADZENIE

Aparaty bębnowe stosowane są w wielu procesach technologicznych inżynierii środowiska, m.in. do rozdrabniania, suszenia, mieszania, przesiewania, granulacji. Mają one zastosowanie do przygotowania mieszanek paszowych, produkcji cementu w młynach bębnowych czy suszenia osadów ściekowych. Cechą wspólną tych urządzeń jest obrotowy bęben, jednak w zależności od rodzaju i przeznaczenia mogą być wyposażone w dodatkowe oprzyrządowanie, takie jak: elementy zaburzające ruch w proce-

sach suszenia czy natrysk podczas prowadzenia granulacji. Aparaty bębnowe odgrywają także ważną rolę w procesie unieszkodliwiania osadów ściekowych. Umożliwiają ich odwodnienie i dosuszenie, oraz pozwalają wykonać granulację odpowiednio przygotowanych osadów. Proces granulacji polega na uzyskaniu aglomeratów materiału na skutek adhezji i występowania napięcia powierzchniowo-kapilarnego cieczy [Heim i in. 1999]. Granulaty mogą być bezpiecznie transportowane i wykorzystane jako paliwa alternatywne [Robak i in. 2006; Szymków, Świtecka 2013; Wzorek 2013].

Zaletą suszarek bębnowych jest szybkie usuwanie wilgoci z dużych partii materiałów. Materiał unoszony jest na skutek obrotów bębna, a cząstki omywane są przez strumień gorącego czynnika przepływającego przez bęben współlub przeciwwądowo. Suszarki bębnowe można podzielić na 3 główne typy: bezprzeponowe (konwekcyjne), przeponowe (kontaktowe) oraz suszarki z żaluzjami. Podstawowym parametrem pracy suszarki jest średni czas przebywania materiału w bębnie. Czas ten jest proporcjonalny do prędkości gazu, współczynnika oporu ruchu materiału w bębnie oraz odwrotnie proporcjonalny do kąta nachylenia aparatu. Wydajność suszarek bębnowych jest zależna od szybkości odnawiania gazu oraz powierzchni jego kontaktu z materiałem suszonym [Strumiłło 1983; Warych 1996; Boruch, Nowakowska 1996; Ademiluy i in. 2010].

W pracy aparatów bębnowych można wyróżnić pięć charakterystycznych stanów zachowania się złoża (rys. 1). Przy niskiej prędkości obrotowej po osiągnięciu przez cząstki tzw. kąta zsypania rozpoczyna się proces toczenia. Przy nieco wyższych prędkościach obrotowych tworzy się tzw. „nerka”, której rdzeń jest nieruchomy, natomiast cząstki na obwodzie ulegają jedynie cyrkulacji, stan ten nazywany jest kaskadowaniem. Przy ciągłym wzroście prędkości obrotowej złoże ulega rozluźnieniu, a cząstki swobodnie opadają – kataraktowanie. Gdy cząstki osiągną najwyższy punkt w bębnie, a więc siła odśrodkowa i grawitacji zrównoważą się rozpoczyna się ich ruch po obwodzie bębna, stan ten odpowiada prędkości krytycznej. Ostatnim z obserwowanych stanów zachodzącym podczas pracy aparatów bębnowych jest wirowanie całego wypełnienia wraz z bębniem.

Zakres pracy aparatów bębnowych można opisać za pomocą czterech prędkości charakterystycznych: początku kataraktowania, końca kataraktowania (stan równowagi), krytycznej i mo-

mentu, w którym całe wypełnienie wiruje wraz z bębniem. Prędkości te można wyliczyć wykorzystując wzory (1) i (2). Oyama zaproponował wzór na prędkości obrotowe dla początku i końca ruchu kataraktowego oraz wirowania całego złoża [Boss 1987]:

$$n = \frac{C}{D^{0,47} \varphi^{0,14}} \text{ [obr} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie: C – stała zależna od ruchu wypełnienia: $C = 54$ – początek kataraktowania, $C = 72$ – koniec kataraktowania, $C \geq 86$ – wirowanie [-];
 D – średnica bębna [m];
 φ – stopień wypełnienia bębna [%].

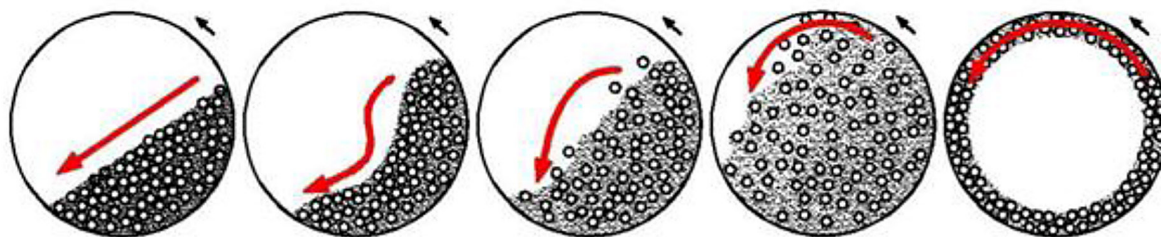
Prędkość krytyczna zgodnie z założeniem o równowadze sił odśrodkowej i grawitacji oblicza się ze wzoru:

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

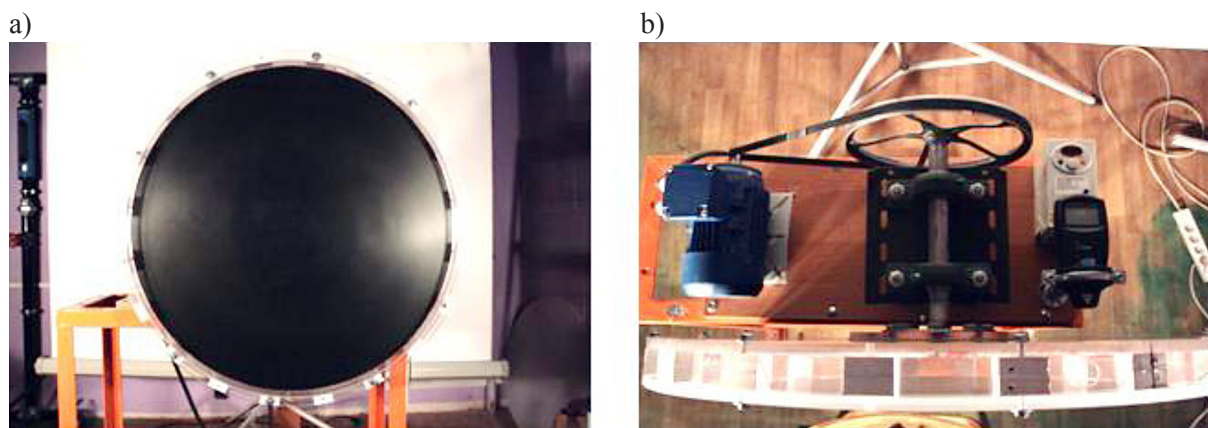
gdzie: g – przyspieszenie ziemskie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];
 R – promień bębna [m];
 D – średnica bębna [m].

METODYKA BADAŃ

Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 2. Głównym elementem stanowiska badawczego jest obrotowy bęben o średnicy 700 mm i szerokości 30 mm, którego obroty wywoływane są poprzez silnik elektryczny asynchroniczny, indukcyjny. Prędkość obrotowa kontrolowana jest poprzez falownik, natomiast jej pomiar dokonywany jest tachometrem optycznym. W celu umożliwienia rejestracji procesów mieszania bęben został wykonany z transparentnego tworzywa sztucznego, a jego tylna część pokryta została czarną emalią. Rejestracja zachowania się złoża dokonywana jest dzięki szybkiej kamerze cyfrowej, z której obrazy zapisywane są w postaci map bitowych na stanowisku komputerowym.

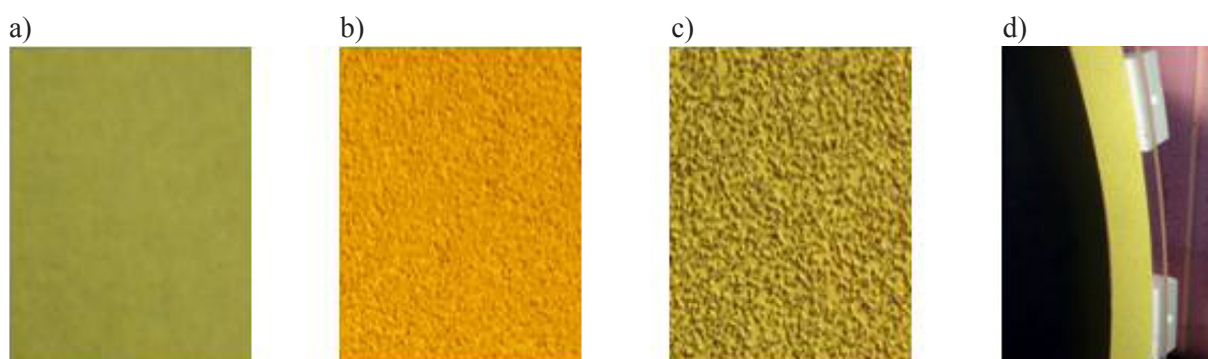


Rys. 1. Ruch wypełnienia podczas pracy aparatów bębnowych
 Fig. 1. The bed movement in rotating drum



Rys. 2. Stanowisko badawcze: a) widok z przodu, b) widok z góry

Fig. 2. Test stand: a) front view, b) top view



Rys. 3. Wykładzina bębna o ziarnistości: a) 120, b) 80, c) 40 oraz d) mocowanie wykładziny

Fig. 3. The drum lining with granularity: a) 120, b) 80 c) 40 and d) fixing the lining

Oprogramowanie PIV (ang. Particle Image Velocimetry) umożliwia wyznaczenie lokalnych pól prędkości oraz trajektorii ruchu poszczególnych cząstek [Ulbrich i in. 2002].

Badania procesów mieszania prowadzono dla złoża monodispersyjnego z zastosowaniem ziarna grochu. Średnica zastępcza ziaren wynosiła 7 mm, a gęstość nasypana $760 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Celem badań było określenie wpływu chropowatości wykładziny bębna na zachowanie się wypełnienia podczas pracy aparatu bębnowego. Przeprowadzono badania dla ścianki gładkiej bębna oraz dla trzech wykładzin, które stanowił papier ścierny o ziarnistości 40, 80 i 120 (rys. 3). Badania wykonano dla pięciu stopni wypełnienia bębna od 15% do 35%, przy prędkościach obrotowych od 0 do 80 obr·min⁻¹.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań prędkości charakterystycznych z uwzględnieniem stopnia wypełnienia bębna przedstawiono w tabelach 1-4. Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna charakte-

rystyczne prędkości maleją. Jedynie prędkość wirowania w niektórych przypadkach rosła, czego powodem może być zwiększenie grubości warstwy wirującego wypełnienia, a tym samym cząstki znajdujące się po wewnętrznej stronie poruszały się torem o mniejszej średnicy. Największą różnicę prędkości odnotowano dla ścianki o ziarnistości 80 i 40.

Zauważono niewielki wpływ chropowatości wewnętrznej ścianki bębna na prędkości charakterystyczne, co mogło być spowodowane niewielkim stosunkiem powierzchni wykładziny do powierzchni całkowitej złoża.

Procesy mieszania zachodzące w aparatach bębnowych są procesami szybkozmiennymi i zastosowanie metodyki pozwalającej na sekwencyjną analizę obrazów daje pełne odzwierciedlenie rzeczywistego zachowania się wypełnienia w bębnie. W tabeli 5 przedstawiono obrazy otrzymane przy pomocy szybkiej kamery, które przetworzono w programie DPIV.

Na podstawie analizy trajektorii ruchu cząstek można określić optymalne warunki pracy aparatów bębnowych uwzględniające rodzaj prowadzonego procesu. Dla większości pro-

Tabela 1. Charakterystyczne prędkości dla bębna o ścianie gładkiej

Table 1. Characteristic speed for the smooth drum wall

Stany charakterystyczne	Stopień wypełnienia bębna				
	15%	20%	25%	30%	35%
Kaskadowanie	12 obr·min ⁻¹	10 obr·min ⁻¹	10 obr·min ⁻¹	8 obr·min ⁻¹	8 obr·min ⁻¹
Początek kataraktowania	24 obr·min ⁻¹	24 obr·min ⁻¹	22 obr·min ⁻¹	20 obr·min ⁻¹	20 obr·min ⁻¹
Stan równowagi	42 obr·min ⁻¹	40 obr·min ⁻¹	38 obr·min ⁻¹	38 obr·min ⁻¹	38 obr·min ⁻¹
Prędkość krytyczna	48 obr·min ⁻¹	48 obr·min ⁻¹	48 obr·min ⁻¹	46 obr·min ⁻¹	46 obr·min ⁻¹
Wirowanie	74 obr·min ⁻¹	74 obr·min ⁻¹	74 obr·min ⁻¹	74 obr·min ⁻¹	76 obr·min ⁻¹

Tabela 2. Charakterystyczne prędkości dla bębna o ścianie pokrytej papierem ściernym o ziarnistości 120

Table 2. Characteristic speed for the drum wall covered with abrasive paper with a granularity 120

Stany charakterystyczne	Stopień wypełnienia bębna				
	15%	20%	25%	30%	35%
Kaskadowanie	10 obr·min ⁻¹	10 obr/min	8 obr/min	8 obr/min	8 obr/min
Początek kataraktowania	26 obr·min ⁻¹	24 obr·min ⁻¹	24 obr·min ⁻¹	22 obr·min ⁻¹	22 obr·min ⁻¹
Stan równowagi	42 obr·min ⁻¹	42 obr·min ⁻¹	42 obr·min ⁻¹	40 obr·min ⁻¹	38 obr·min ⁻¹
Prędkość krytyczna	50 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹	48 obr·min ⁻¹	48 obr·min ⁻¹
Wirowanie	74 obr·min ⁻¹	76 obr·min ⁻¹	76 obr·min ⁻¹	76 obr·min ⁻¹	76 obr·min ⁻¹

Tabela 3. Charakterystyczne prędkości dla bębna o ścianie pokrytej papierem ściernym o ziarnistości 80

Table 3. Characteristic speed for the drum wall covered with abrasive paper with a granularity 80

Stany charakterystyczne	Stopień wypełnienia bębna				
	15%	20%	25%	30%	35%
Kaskadowanie	10 obr·min ⁻¹	10 obr·min ⁻¹	8 obr·min ⁻¹	8 obr·min ⁻¹	6 obr·min ⁻¹
Początek kataraktowania	26 obr·min ⁻¹	26 obr·min ⁻¹	26 obr·min ⁻¹	24 obr·min ⁻¹	22 obr·min ⁻¹
Stan równowagi	42 obr·min ⁻¹	42 obr·min ⁻¹	40 obr·min ⁻¹	38 obr·min ⁻¹	38 obr·min ⁻¹
Prędkość krytyczna	50 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹
Wirowanie	74 obr·min ⁻¹	74 obr·min ⁻¹	76 obr·min ⁻¹	76 obr·min ⁻¹	78 obr·min ⁻¹

Tabela 4. Charakterystyczne prędkości dla bębna o ścianie pokrytej papierem ściernym o ziarnistości 40

Table 4. Characteristic speed for the drum wall covered with abrasive paper with a granularity 40

Stany charakterystyczne	Stopień wypełnienia bębna				
	15%	20%	25%	30%	35%
Kaskadowanie	10 obr·min ⁻¹	8 obr·min ⁻¹	8 obr·min ⁻¹	6 obr·min ⁻¹	6 obr·min ⁻¹
Początek kataraktowania	26 obr·min ⁻¹	26 obr·min ⁻¹	24 obr·min ⁻¹	24 obr·min ⁻¹	24 obr·min ⁻¹
Stan równowagi	42 obr·min ⁻¹	42 obr·min ⁻¹	40 obr·min ⁻¹	40 obr·min ⁻¹	38 obr·min ⁻¹
Prędkość krytyczna	52 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹	50 obr·min ⁻¹	48 obr·min ⁻¹
Wirowanie	74 obr·min ⁻¹	74 obr·min ⁻¹	74 obr·min ⁻¹	76 obr·min ⁻¹	78 obr·min ⁻¹

cesów mieszania zachodzących w aparatach bębnowych należy doprowadzić złoże do stanu kataraktowania. Zanim osiągnięta zostanie prędkość kataraktowania (tj. podczas toczenia i kaskadowania) w złożu tworzy się tzw. „martwa strefa”, w której cząstki nie ulegają mieszanin. Końcowi kataraktowania odpowiada tzw. stan równowagi, kiedy pojedyncze cząstki po

oderwaniu od złoża opadają na przeciwległą ścianę aparatu. Wiąże się to ze spadkiem intensywności procesu mieszania, na skutek cyrkulacji złoża.

Przykładowe wyniki uzyskane na drodze eksperymentalnej dla ścianki gładkiej i wypełnienia 25% porównano z wynikami obliczeń teoretycznych wg. wzorów (1) i (2) (tab. 6).

Tabela 5. Charakterystyczne stany zachowania się złoża dla wypełnienia 25%

Table 5. Characteristic behavior of the bed for the fill-in-degree of 25%

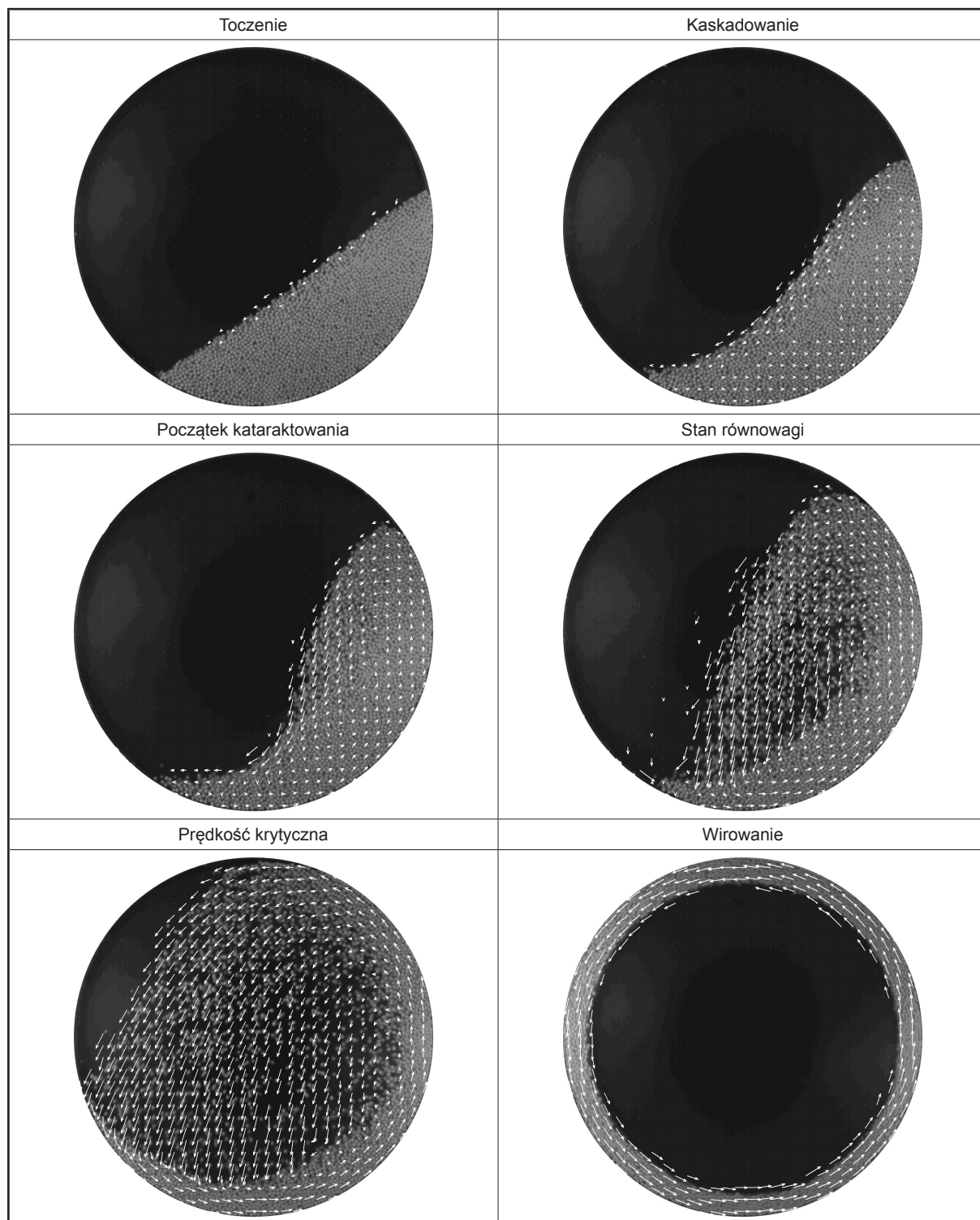


Tabela 6. Prędkości charakterystyczne otrzymane na drodze eksperymentalnej oraz obliczone

Table 6. Characteristics velocity obtained experimentally and calculated

Charakterystyczne prędkości obrotowe	Minimalna [obr·min ⁻¹]	Maksymalna [obr·min ⁻¹]	Krytyczna [obr·min ⁻¹]	Wirowanie [obr·min ⁻¹]
Obliczone	40,69	54,25	50,56	64,80
Zbadane	22	38	48	74

Największe różnice charakterystycznych prędkości obrotowych podczas eksperymentu w porównaniu z wynikami obliczeń na podstawie wzorów (1) i (2) odnotowano dla prędkości minimalnej (różnica wynosiła 18,61 obr·min⁻¹), najmniejsze dla prędkości krytycznej (różnica wynosiła 2,56 obr·min⁻¹). Należy jednak pamiętać że wzór na prędkość krytyczną odnosi się do ruchu pojedynczej cząstki oraz nie uwzględnia stopnia wypełnienia bębna.

WNIOSKI

1. Charakterystyczne prędkości obrotowe bębna ze ściankami gładkimi oraz z przymocowaną szorstką wykładziną różnią się o wartość maksymalnie 4 obr·min⁻¹.
2. Wyniki eksperymentu porównane z wynikami obliczeń teoretycznych na podstawie wzorów (1) i (2) pokazały, że największe różnice charakterystycznych prędkości obrotowych występują dla prędkości minimalnej (ok. 46%), a najmniejsze dla prędkości krytycznej (ok. 5%).
3. W przypadku zmiany ziarnistości wykładziny nie odnotowano znacznych różnic w zachowaniu się wypełnienia. Stwierdzono konieczność przeprowadzenia dalszych badań wpływu chropowatości ścianek aparatu na prędkości charakterystyczne zwiększając powierzchnię kontaktu materiału z wykładziną.
4. Zastosowana metodyka sekwencyjnej analizy obrazu umożliwiła analizę zachowania się złoża w aparatach bębnowych, co można wykorzystać do poprawy warunków procesu mieszania.

BIBLIOGRAFIA

1. Ademiluyi F., Abowei M., Puyate Y., Achinewhu S., 2010. Effects of drying parameters on heat transfer during drying of fermented ground cassava in a rotary dryer. *Drying Technology*, 28, 550–561.
2. Boruch M., Nowakowska K., 1996. *Technologia spożywczych suszów ziemniaczanych*. Wyd. II. Łódź, 9–17, 58–84.
3. Boss J., 1987. *Mieszanie materiałów ziarnistych, Kinetyka procesu mieszania materiałów ziarnistych. Aparaty i urządzenia do mieszania materiałów ziarnistych*. PWN, Warszawa, Wrocław, 84–98, 133–144.
4. Heim A., Gluba T., Obraniak A., 1999. Badanie momentu obrotowego podczas granulacji bębnowej. XXXVI Seminarium Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii, 49–62.
5. Robak J., Kopczyński M., Ociepka W., 2006. Sposoby utylizacji odpadów w technikach komaktowania – granulacja. *Zesz. Nauk. Inż. Chem. i Proc. Pol. Łódź.*, 29, 111–121.
6. Strumiłło C., 1983. *Podstawy teorii i techniki suszenia*. WNT, Warszawa.
7. Szymków J., Świtecka M., 2013. Granulacja zhi-gienizowanych osadów ściekowych. *Inż. Ap. Chem.*, 52 (3), 262–263.
8. Ulbrich R., Krótkiewicz M., Szmolke N., Anweiler S., Masiukiewicz M., Zając D., 2002. Recognition of two phase 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. Warych J., 1996. *Aparatura chemiczna i procesowa*. Warszawa, 127–153.
10. Wzorek M., 2013. Eksperymentalna weryfikacja modelu tworzenia paliw z odpadów na przykładzie komunalnych osadów ściekowych. *Studia i monografie*, 346, Politechnika Opolska.



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.