www.ptcer.pl/mccm

MATERIAŁY CERAMICZNE /CERAMIC MATERIALS/, 66, 3, (2014), 336-340

Badanie modelowe ruchu wypełnienia podczas pracy młynów kulowych

Karolina Skoczkowska*, Krystian Malek, Roman Ulbrich**

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Środowiska, ul. St. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole
*e-mail: k.skoczkowska@doktorant.po.edu.pl
**e-mail: r.ulbrich@po.opole.pl

Streszczenie

Młyny kulowe stosowane są od wielu lat w licznych gałęziach przemysłu. W urządzeniach tych proces rozdrabniania zachodzi w wyniku zderzania się mielników z mieliwem i ściankami komory młyna oraz wzajemnego tarcia cząstek materiałów. Celem badań eksperymentalnych było określenie zachowania się wypełnienia podczas pracy młynów kulowych, a tym samym wyznaczenie prędkości obrotowych bębna, dla których proces rozdrabniania zachodzi z odpowiednią intensywnością. Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, którego głównym elementem był obrotowy bęben o średnicy 700 mm i szerokości 30 mm, zamieszczony na obrotowym wale. Do rejestracji zachowania się wypełnienia w bębnie wykorzystano szybką, cyfrową kamerę CMOS. Na podstawie otrzymanych z kamery map bitowych, w programie DPIV (z ang. *digital particle image velocimetry*) wyznaczono lokalne pola prędkości oraz trajektorię ruchu cząstek. Umożliwiło to wyznaczenie prędkości obrotowych bębna odpowiadających momentom charakterystycznym, tj.: początkowi ruchu kaskadowego – tzw. nerka, początkowi i końcowi ruchu kataraktowego, rozpoczęciu wirowania pierwszej cząstki mielników - prędkość krytyczna oraz wirowaniu wszystkich cząstek. Wypełnienie bębna stanowiła mieszanina polidyspersyjna cząstek kulistych wykonanych z tworzywa sztucznego o średnicy 6 mm oraz cząstek Zirblast B60 o średnicy 125-250 μm. Badania przeprowadzono dla trzech stopni wypełnienia mielnikami – 20%, 25% i 30%, przy stałym stopniu wypełnienia młyna mieliwem – 10%. Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna charakterystyczne stany zachodziły przy podobnych lub niższych prędkościach obrotowych. W celu określenia wpływu powierzchni wewnętrznej młyna kulowego na kinetykę ruchu wypełnienia badania przeprowadzono dla trzech rodzajów wykładzin, umieszczonych na pobocznicy bębna: ścianka gładka z tworzywa sztucznego, guma oraz ocynkowana taśma stalowa. Zastosowane wykładziny spowodowały zmniejszenie prędkości, przy których zachodzą stany charakterystyczne. Koniec kataraktowania odpowiada prędkości równej 0,6-0,8 prędkości krytycznej, wyznaczonej na drodze eksperymentalnej. Trajektoria ruchu cząstki mielników dla końca ruchu kataraktowego odpowiada najdłuższej drodze opadania cząstki w młynie. Zastosowana metodyka badawcza pozwoliła na określenie zachowania się mielników podczas pracy młyna kulowego. Wyniki badań potwierdzają wpływ stopnia wypełnienia młyna oraz wykładzin na zachowanie się mielników. Wskazuje to na celowość przeprowadzenia dalszych badań nad kinetyką procesu mielenia.

Słowa kluczowe: młyn kulowy, młyn cementowy, analiza ruchu wypełnienia, kinetyka ruchu wypełnienia, rozdrabnianie

MODEL RESEARCH ON FILLING MOTION DURING BALL MILLS OPERATION

Ball mills are used in the cement industry for many years. In that kind of devices, the crushing process occurs as a result of collisions between grinding media and particles of material to be ground, and what is more, walls of the mill. Further, the described process embodied the mutual friction of the crushed particles. The aim of experimental research was to determine the behaviour of the grinding media while operating in a ball mill, and simultaneosly to measure rotational speeds of a drum, for which the milling process occurs with an appropriate intensity. The research was conducted on a test-bench that included, as a main feature, a rotating drum with a diameter of 700 mm and a width of 30 mm, posted on a rotating shaft. An examination of behaviour of the grinding media placed in the drum was possible to achieve due to recording data by a fast-speed camera. Based on registered bitmaps, assayed by using an analyzer DPIV (Digital Particle Image Velocimetry), local field speeds and a trajectory of moving particles were determined. This has allowed us to determine the rotational speeds that correspond to characteristic moments of the particle movement i.e.: the beginning of cascading, so-called the kidney phenomenon; the beginning and the end of cataracting motion; the commencement of swirling of the first grinding medium – critical speed, and the moment when the whole charge start to centrifuge. A polydisperse mixture including two types of spherical particles made of plastic material (a diameter of 6 mm) and Zirblast B60 (a diameter of 125-250 μm) constituted the charge. The research was conducted for three grinding media filling-degrees of 20%, 25%, and 30% at a constant content of material to be ground established on 10%. With an increase in the filling degree characteristic moments occured at similar or lower rotational speeds. The study was carried out in order to determine the impact of inner surface of the ball mill on kinetics of grinding media motion for three types of lining; plastic, rubber and galvanized steel tape was placed on a drum's smooth contour wall. The use of the lining caused a reduction in the speed at which characteristic moments occurred. The end of the cataracting corresponds to a rotational speed of 0.6-0.8 critical speed, designated on experimental way. A trajectory at the end of the cataracting motion corresponds to the longest descending path of a moving grinding medium. The applied research methodology has allowed us to determine the behaviour of grinding media while operating of a ball mill. The test results confirm the influence of filling degree and also the type of lining on the behaviour of grinding media. This indicates the desirability to carry out further research on the kinetics of milling.

Keywords: Ball mill, Cement mill, Analysis of charge motion, Kinetics of charge motion, Grinding

1. Wstęp

Proces rozdrabniania materiałów ziarnistych w młynach kulowych zachodzi w wyniku tarcia oraz zderzania się mielników z mieliwem i ściankami młyna. Zachowanie się wypełnienia, a co za tym idzie intensywność rozdrabniania, zależy od stopnia i rodzaju wypełnienia, prędkości obrotowej i średnicy młyna, a także jego powierzchni wewnętrznej - tzw. wykładzin [1, 2] .

W zależności od prędkości obrotowej młyna kulowego można wyróżnić kilka stanów zachowania się wypełnienia (Rys. 1). Przy bardzo niskich prędkościach obrotowych wypełnienie ulega jedynie poślizgowi (Rys. 1a). Gdy wypełnienie osiągnie tzw. kąt zsypu rozpoczyna sie proces toczenia cząstek po złożu (Rys. 1b). Kolejnym charakterystycznym stanem jest kaskadowanie, w czasie którego tworzy się tzw. „nerka", wewnątrz której znajduje się zwarty, nieruchomy rdzeń (Rys. 1c). Przy wyższej prędkości obrotowej cząstki po oderwaniu się od pobocznicy bębna swobodnie opadają na złoże i toczą się po nim w dół - ruch ten nazywany jest kataraktowaniem (Rys. 1d). Ostatnim stanem jest wirowanie całego wypełnienia po obwodzie bębna (Rys. 1e) [3, 4].

W literaturze dokonywano prób wyznaczenia wzorów na prędkości obrotowe odpowiadające charakterystycznym stanom zachowania się wypełnienia.

Prędkości charakterystyczne odpowiadające początkowi i końcowi ruchu kataraktowego oraz wirowania całego wypełnienia wyznaczone przez Oyamę [5] mają postać:

$$n_{ch} = \frac{C}{D^{0,47}\varphi^{0,14}} \quad \text{[obr./min]} \tag{1}$$

gdzie: C - stała zależna od stanu zachowania się złoża: C = 54 - dla początku kataraktowania, C = 72 - dla końca kataraktowania, $C \geq 86$ - dla wirowania całego wypełnienia, D - średnica bębna [m], φ - stopień wypełnienia bębna [%].

Prędkość krytyczna - odpowiadająca momentowi, w którym siły ciężkości i odśrodkowa równoważą się, a pojedynczy mielnik (cząstka), znajdujący się w warstwie przylegającej do wykładziny bębna, rozpoczyna ruch wirowy po jego obwodzie opisana jest równaniem:

$$n_k = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad \text{[obr./min]} \tag{2}$$

gdzie: g - przyśpieszenie ziemskie [m/s^2], R - promień bębna [m].

Prędkość, z jaką porusza się mielnik (cząstka) zanim osiągnie prędkość krytyczną można wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$v_o = n2\pi R \text{ [m/s]} \tag{3}$$

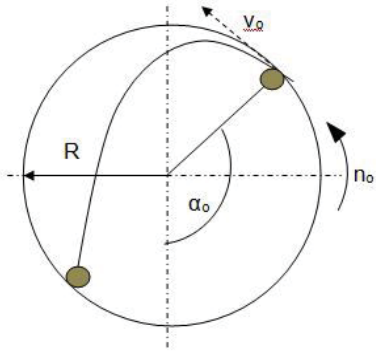
Kąt α_o, przy którym mielnik (cząstka) odrywa się od ściany bębna można wyznaczyć ze wzoru:

$$\alpha_o = \arccos\left(-\frac{(n2\pi)^2 R}{g}\right) \quad [^o] \tag{4}$$

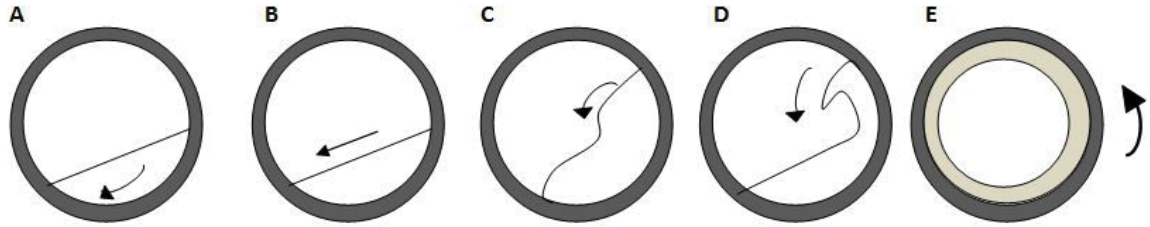
Moment oderwania mielnika (cząstki) od ściany przedstawiony został na Rys. 2.

Najczęściej młyny kulowe pracują w warunkach kaskadowania lub kataraktowania, co odpowiada prędkości obrotowej o wartości wynoszącej 0,6-0,8 prędkości krytycznej [2, 6]. Prędkość obrotowa młynów cementowych wynosi od 63% do 75% n_k, z kolei w młynach stosowanych do przeróbki rud od 75% do 85% n_k [6].

Celem badań eksperymentalnych było określenie kinetyki zachowania się wypełnienia podczas pracy młynów kulowych, a tym samym wyznaczenie prędkości obrotowych bębna, dla których proces rozdrabniania zachodzi z odpowiednią intensywnością; wyznaczenie prędkości obrotowych bębna odpowiadających charakterystycznym stanom ruchu wypełnienia. Do tego celu wykorzystano cyfrową anemometrię obrazów umożliwiającą wyznaczenie lokalnych pól prędkości oraz trajektorii ruchu mielników, co pozwala określić zachowanie się wypełnienia podczas pracy młyna. Energię opadania mielników można określić na podstawie wektorów prędkości wyznaczonych przy pomocy metody PIV (z ang. *particle image velocimetry*). Badania tego typu pomogą w optymalizacji procesu ze względu na energię mielników, a nie jak w większości dotychczasowych badań uwzględniając jedynie jakość rozdrobnienia produktu końcowego. W celu określenia wpływu powierzchni wewnętrznej młyna kulowego na kinetykę ruchu wypełnienia badania przeprowadzono w przypadku trzech rodzajów wykładzin,



Rys. 2. Ruch cząstki w bębnie młyna kulowego, wg [2].
Fig. 2. Particle motion in a ball mill drum, acc. to [2].



Rys. 1. Pięć stanów zachowania się wypełnienia: a) poślizg, b) toczenie się, c) kaskadowanie, d) kataraktowanie, e wirowanie, wg [3, 4].
Fig. 1. Five states of bed behaviour: a) slip, b) rolling, c) cascading, d) cataracting, e) centrifugation; acc. to [3, 4].

umieszczonych na pobocznicy bębna: ścianka gładka z tworzywa sztucznego, guma oraz ocynkowana taśma stalowa.

2. Metodyka badań

Głównym elementem stanowiska badawczego jest obrotowy bęben wykonany z transparentnego pleksiglasu, dzięki czemu możliwa jest obserwacja zachodzących procesów podczas pracy aparatu. Średnica wewnętrzna bębna wynosi 700 mm, natomiast szerokość 30 mm. Tylna ściana bębna pokryta została czarna emalią w celu zwiększenia kontrastu pomiędzy wypełnieniem, a bębnem. Bęben usadowiony jest na obrotowym wale, wprawianym w ruch poprzez asynchroniczny silnik indukcyjny. Prędkość obrotowa mierzona jest przy pomocy tachometru optycznego, a regulowana za pomocą falownika. Demontaż przedniej ściany bębna umożliwił wymianę tzw. wykładzin, a tym samym określenie wpływu jakości powierzchni bębna na zachowanie się wypełnienia podczas pracy młynów kulowych. Do rejestracji zachowania się wypełnienia podczas pracy młyna wykorzystano szybką, monochromatyczną kamerę cyfrową CMOS, połączoną ze stanowiskiem komputerowym. W dalszej obróbce otrzymanych z kamery map bitowych, użyto programu DPIV (z ang. *digital particle image velocimetry*). Na Rys. 3 przedstawiono schemat stanowiska badawczego.

Dzięki zastosowaniu cyfrowej anemometrii obrazów możliwe jest wyznaczenie lokalnych pól prędkości oraz trajektorii ruchu cząstek, co pozwala określić zachowanie się wypełnienia podczas ruchu aparatu bębnowego.

Wypełnienie stanowiła polidyspersyjna mieszanina cząstek kulistych o rożnej średnicy oraz gęstości nasypowej. Parametry składników mieszaniny przedstawiono w Tabeli 1. Mielniki stanowiły cząstki o większej średnicy i o dwukrotnie większej gęstości nasypowej, natomiast mieliwo stanowiły cząstki Zirblast B60. Z punktu widzenia badań nad kinetyką procesu istotne jest zachowanie różnicy pomiędzy średnicami oraz gęstościami mielników i mieliwa. Na tym etapie badań nie zajmowano się właściwym procesem rozdrabniania, a jedynie samą kinetyką zachowania się wypełnienia. Badania przeprowadzono dla trzech stopni wypełnienia mielnikami: 20%, 25% i 30%, przy stałym 10% stopniu wypełnienia cząstkami mieliwa. Według analizy chemicznej wykonanej przez firmę Zirblast, produkt Zirblast B60 zawiera: ZrO_2 (60-70)%, SiO_2 (28-33)%, Al_2O_3 <10%.

Współczynnik tarcia składników mieszaniny wyznaczony został na podstawie statycznego, zewnętrznego kąta zsypu:

$$f = \mathrm{tg}\beta \tag{5}$$

Badania przeprowadzono dla trzech rodzajów wykładzin: ścianki gładkiej wykonanej z pleksiglasu, gumy oraz metalowej ocynkowanej taśmy stalowej.

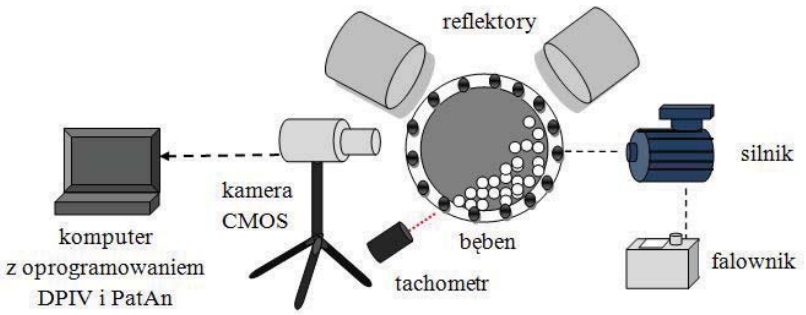
Badania przeprowadzono przy prędkościach obrotowych od 0 obr./min do 80 obr./min, zwiększając prędkości obrotową, tak aby wszystkie charakterystyczne stany zachowania się wypełnienia zostały osiągnięte.

Charakterystyczne stany określono na podstawie wyznaczonych wektorów prędkości i ich ocenę wizualną:

- kaskadowania - prędkość obrotowa w czasie, której pojawia się tzw. „nerka" (Rys. 4a),
- początek kataraktowania - (a tym samym koniec kaskadowania) prędkość obrotowa w czasie, której wypełnienie uległo rozluźnieniu, a cząstki rozpoczynały swobodny ruch i opadały na wypełnienie, po którym toczyły się w dół (Rys. 4b),
- koniec kataraktowania - stan równowagi, prędkość obrotowa, w czasie której cząstki opadały poza złoże (brak procesu toczenie się cząstek po wypełnieniu) (Rys. 4c),
- prędkość krytyczna - pojawienie się cząstki w najwyższym punkcie bębna, rozpoczęcie jej wirowania (Rys. 4d),
- wirowanie - prędkość, przy której rozpoczyna się wirowanie całego wypełnienia po obwodzie bębna (Rys. 4e).

3. Wyniki badań

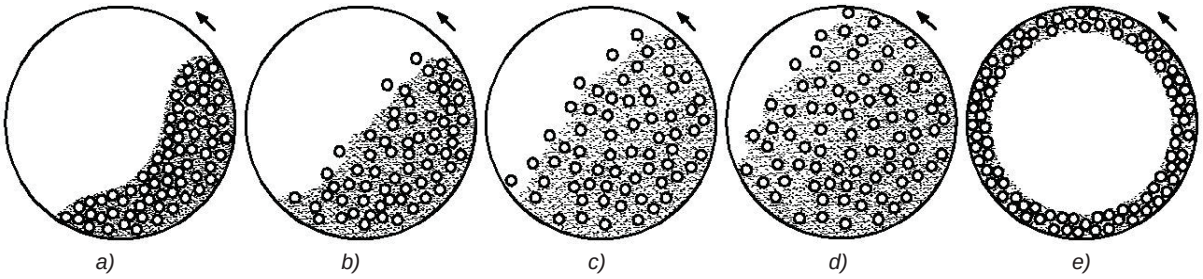
Wykorzystanie cyfrowej anemometrii obrazów pozwoliło na wyznaczenie charakterystycznych stanów zachowania się złoża podczas pracy młyna bębnowego. W programie DPIV wyznaczono wektory prędkości cząstek wypełnienia.



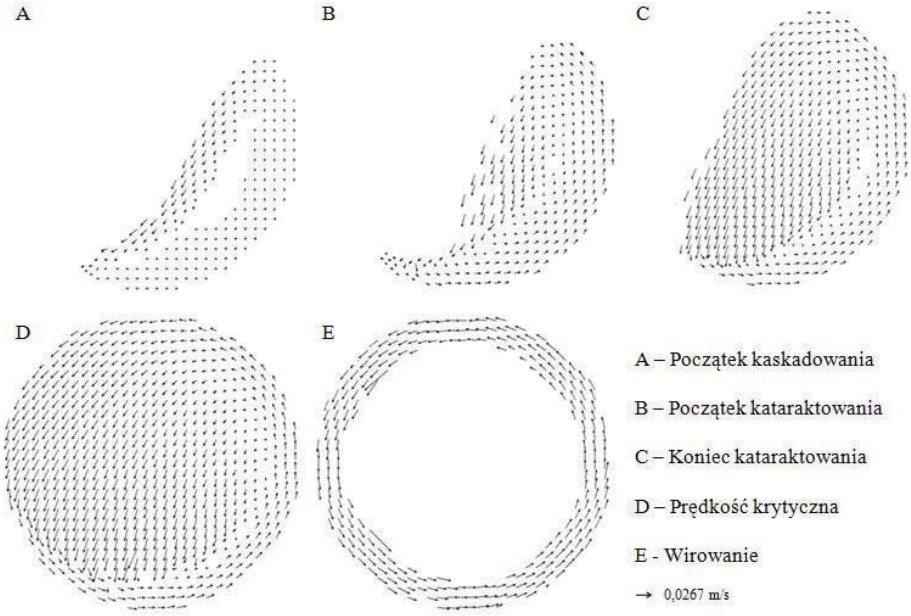
Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego.
Fig. 3. Scheme of test stand.

Tabela 1. Zestawienie użytych w badaniu materiałów.
Table 1. Summary of materials used in the study.

Symbol materiału	Rodzaj materiału	Średnica cząstek	Gęstość nasypowa [kg/m^3]	Kąt zsypu [º]	Współczynnik tarcia [-]
A	Tworzywo ABS (akrylonitrylo-butadieno-styren	6 mm	1320	33	0,65
B	Zirblast B60	125-250 μm	660	26	0,49



Rys. 4. Ruch wypełnienia podczas pracy młynów kulowych: a) kaskadowanie, b) początek kataraktowania, c) koniec kataraktowania, d) prędkość krytyczna, e) wirowanie.
Fig. 4. Movement of filling during operating of ball mills: a) cascading, b) begining of cataracting, c) end of cataracting, d) critical velocity, e) centrifugation.



Rys. 5. Wektory prędkości mielników podczas charakterystycznych stanów.
Fig. 5. Velocity vectors of grinding media during the characteristic states.

Tabela 2. Prędkości charakterystyczne wyznaczone na drodze eksperymentalnej dla ścianki gładkiej.
Table 2. Characteristic rotational speeds determined experimentally for smooth walls.

Stopień wypełnienia bębna			
Stany charakterystyczne	20% A + 10% B	25% A + 10% B	30% A + 10% B
Początek kaskadowania	11	10	10
Początek kataraktowania	24	23	22
Koniec kataraktowania	40	38	36
Prędkość krytyczna	48	48	46
Wirowanie	76	76	78

Obrazy otrzymane z programu dla ścianki gładkiej, określające prędkości, przy których zachodziły charakterystyczne stany pokazano na Rys. 5. Na podstawie długości wektorów prędkości możliwe jest określenie z jaką siłą mielniki uderzają o wypełnienie oraz ścianki bębna.

W Tabelach 2-4 przedstawiono wyznaczone eksperymentalnie prędkości, odpowiadające stanom charakterystycznym procesu zachodzącym w młynach kulowych, dla ścianki gładkiej oraz dwóch rodzajów wykładzin.

Prędkość krytyczna wyliczona ze wzoru (2) dla bębna o średnicy 700 mm wynosi 50,1 obr./min; w badaniach eksperymentalnych prędkość ta mieści się w przedziale 44–48 obr./min w zależności od stopnia wypełnienia i rodzaju wykładziny (Tabela 2-4).

Błąd pomiarowy wykonany dla serii badań przy 25% A + 10% B zapełnieniu bębna wynosi dla początku kaskadowania – 14,6%, początku kataraktowania – 7,9%, końca kataraktowania – 3,3%, prędkości krytycznej – 1,9% i wirowania – 1,6%

Natomiast odchylenie średnie dla początku kaskadowania wynosi 0,80 obr./min, początku kataraktowania – 0,82 obr./min, końca kataraktowania – 0,65 obr./min, prędkości krytycznej – 0,6 obr./min i wirowania – 0,56 obr./min.

Prędkość pracy młynów kulowych, tj. 0,6-0,8 n_k dla prędkości krytycznej wyznaczonej na drodze eksperymentalnej odpowiada procesowi kataraktowania.

Zauważalny jest wpływ rodzaju wykładzin w aparacie bębnowym na zachowanie się wypełnienia podczas pracy aparatu. Stany charakterystyczne w bębnie o ściance gładkiej zachodzą przy wyższych prędkościach obrotowych niż dla bębna o ściance pokrytej wykładzinami.

Zwiększenie stopnia wypełnienia młyna, a co za tym idzie powierzchni kontaktu pomiędzy mielnikami i mieliwem,

Tabela 3. Prędkości charakterystyczne wyznaczone na drodze eksperymentalnej dla wykładziny metalowej.
Table 3. Characteristic rotational speeds determined experimentally for metal walls.

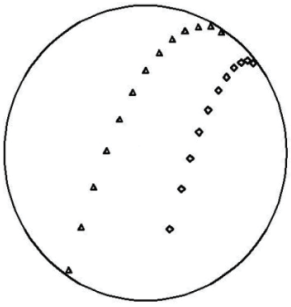
Stopień wypełnienia bębna			
Stany charakterystyczne	20% A + 10% B	25% A + 10% B	30% A + 10% B
Początek kaskadowania	8	8	8
Początek kataraktowania	20	20	20
Koniec kataraktowania	38	34	34
Prędkość krytyczna	47	45	45
Wirowanie	76	76	80

Tabela 4. Prędkości charakterystyczne wyznaczone na drodze eksperymentalnej dla wykładziny gumowej.
Table 4. Characteristic rotational speeds determined experimentally for rubber walls.

Stopień wypełnienia bębna			
Stany charakterystyczne	20% A + 10% B	25% A + 10% B	30% A + 10% B
Początek kaskadowania	7	7	7
Początek kataraktowania	19	19	19
Koniec kataraktowania	38	34	34
Prędkość krytyczna	47	44	44
Wirowanie	75	77	78

spowodowało spadek prędkości odpowiadających stanom charakterystycznym dla ścianki gładkiej. Przy zmianie stopnia wypełnienia bębna z 20% do 25% w przypadku obu wykładzin zaobserwowano również spadek ww. prędkości obrotowych; dalsze zwiększenie ilości mieliwa nie wpłynęło na stany charakterystyczne.

Na podstawie analizy następujących po sobie obrazów wyznaczono trajektorię opadania najbardziej wysuniętego mielnika (Rys. 6). Trajektoria ruchu mielnika w przypadku końca ruchu kataraktowego odpowiada najdłuższej drodze opadania mielnika w młynie. W procesie mielenia, dla którego pożądana jest maksymalna siła uderzeniowa mielników o mieliwo, prędkość obrotowa bębna powinna być równa prędkości odpowiadającej końcowi ruchu kataraktowego. Dla procesów zachodzących w młynach kulowych, o przewadze sił tarcia nad siłami uderzeniowymi prędkości obrotowe mogą być odpowiednio niższe.



Rys. 6. Trajektoria ruchu mielnika dla początku i końca ruchu kataraktowego.
Fig. 6. Motion trajectory of grinding medium for start and end of cataracting motion.

4. Wnioski

- Zastosowana metodyka badawcza pozwoliła na określenie stanów charakterystycznych.
- Ruch wypełnienia młynów kulowych jest zależny od rodzaju stosowanych wykładzin oraz stopnia zapełnienia bębna.
- Trajektoria ruchu najbardziej wysuniętego mielnika w czasie końca kataraktowania odpowiada najdłuższej drodze opadania cząstki.
- Konieczne są dalsze badania modelowe ruchu wypełnienia w aparacie bębnowym w celu optymalizacji procesów w nim zachodzących.

Podziękowanie

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego – *„Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego”.*

Literatura

[1] Olejnik, T. P., Gluba, T., Obraniak, A.: Kinetyka mielenia kwarcu przy kaskadowym ruchu złoża nadawy, *Inż. Ap. Chem.*, 48, 4, (2009), 100-101.
[2] Wu, M., Wang, V.: Modelling ball impact on the wet mill liners and its application in predicting mill magnetic liner performance, *Minerals Engineering*, 61, (2014), 126–132.
[3] Chou, H. T., Lee, C. F.: Cross-sectional and axial flow characteristics of dry granular material in rotating drums, *Granular Matter*, 11, (2009), 13–32.
[4] Rosenkranz, S., Breitung-Faes, S., Kwade, A.: Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills, *Powder Technology*, 212, (2011), 224–230.
[5] Oyama, Y.: Studies on Mixing of Binary System of Two Size by Ball Mill Motion, *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Research*, 951, (1940),17-29.
[6] Battaglia, A., Banaszewski, T.: *Maszyny do przeróbki węgla, rud i surowców mineralnych*, Wyd. PWN, Warszawa – Kraków, (1972).

♦

Otrzymano 30 czerwca 2014, zaakceptowano 24 lipca 2014