

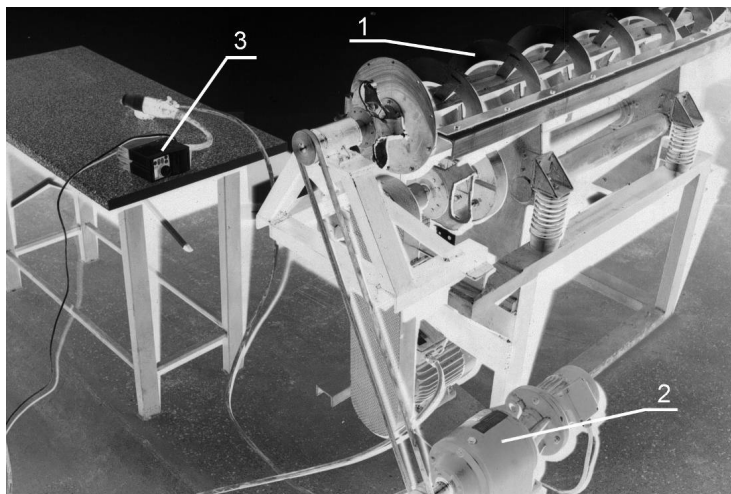
Jacek FELIKS

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych
E-mail: feliks@agh.edu.pl

Badania symulacyjne ruchu grudek w rynnowym grudkowniku wibracyjnym

1 Wstęp

W Katedrze Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH skonstruowano i przebadano rynnowy grudkownik wibracyjny pokazany na rysunku 1. Grudkownik ten zbudowany jest z rynny wykonującej drgania kołowe wokół własnej osi. Materiał pylisty znajdujący się w rynnie jest podrzucany, a po powtórny zetknięciu się z rynną następuje jego zbrylanie (grudkowanie). Zasadniczym celem badań grudkowania opisanych w pracy [1] było określenie zależności wytrzymałości wytworzonych grudek od wskaźnika podrzutu. Parametr ten charakteryzuje jakość otrzymanego granulatu.



Rys. 1. Rynnowy grudkownik wibracyjny wyposażony w ślimak

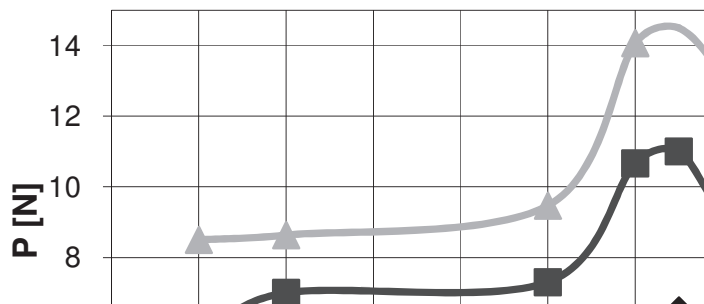
Fig. 1. Chute balling tamber with a snail

Badania polegały na zgranulowaniu pyłu przy określonym wskaźniku podrzutu, a następnie grudki po ok. 30 [min] od zakończenia grudkowania były ściskane na urządzeniu opisanym w pracy [1]. Badanie to określa wartość wytrzymałości grudek na naciski statyczne. Wyniki otrzymane obrazuje przykładowy wykres 2.

Niskie wartości wytrzymałości grudek wytworzonych przy wskaźniku podrzutu $u_2=6$ były pewnym zaskoczeniem, gdyż właśnie dla tej wartości zgodnie z przebiegami

przedstawionymi w pracy [1] spodziewano się uzyskać produkt o najwyższej wytrzymałości. Maksymalne wartości uzyskano przy nieco mniejszej wartości wskaźnika podrzutu leżącego w wąskim przedziale $u_2=5\div 5,5$. Różnica w położeniu maksymalnej wartości wytrzymałości grudki w porównaniu z wcześniejszymi rozważaniami (praca [1]) spowodowana mogła być kształtem rynny. Wąski przedział maksymalnych wartości sił ściskających i gwałtowne spadki tej siły są zgodne z rozważaniami teoretycznymi. Różnice w siłach ściskających grudki dla amplitudy $A=8,3$ [mm] i $A=4,5$ [mm] przy wskaźniku podrzutu $u_2=5\div 5,5$ były niewielkie, co jest zgodne z rozważaniami na temat mocy przekazywanej grudce.

A = 3,0 [mm]



Rys. 2. Zależność wytrzymałości grudek od wskaźnika podrzutu dla amplitudy 3.0 mm
 Fig. 2. Dependence of strength of pellets from the ejection rate for the amplitude of 3.0 mm

W celu wyjaśnienia przyczyn tych rozbieżności postanowiono przeanalizować dokładniej ruch grudki w rynnowym grudkowniku wibracyjnym wykorzystując w tym celu metodę symulacji. Aby ta analiza była bardziej dokładna postanowiono uwzględnić półokrągły kształt rynny grudkownika jak również położenie początkowe grudki na ścianie rynny.

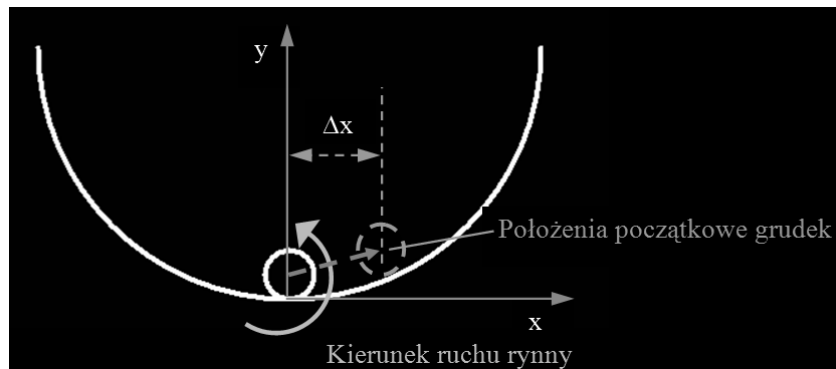
2 Opis programu do symulacji ruchu grudki w grudkowniku

Wstępna próba analizy teoretycznej ruchu grudki wykorzystuje model, w którym zastosowano duże uproszczenia. Powierzchnia podzuczająca była płaska (układ jednoosiowy), a nie jak jest w rzeczywistości półokrągła (płaski układ współrzędnych). Dodatkowo nie było możliwe ustalenie położenia początkowego grudki na ścianie, jak również nie uwzględniono drugiej – poziomej – składowej prędkości. Przypuszczano, że te uproszczenia spowodowały niewielkie rozbieżności w położeniach optymalnych wskaźników podrzutu. W celu otrzymania dokładniejszych wyników analizy przeprowadzono próbę symulowania ruchu grudki w grudkowniku.

Do symulacji tej opracowano model rynny grudkownika pokazany na rysunku 3. Model ten jest poprzecznym przekrojem rynny o określonym promieniu wykonujący ruch obrotowy wokół własnej osi. W rynnie tej znajduje się grudka o ustalonej średnicy.

W modelu tym w porównaniu do modelu z pracy [1] uwzględniono półokrągły kształt rynny jak i położenie początkowe grudki na ściankach grudkownika. Model ten był zgodny z zaobserwowanym układaniem się warstwy materiału w grudkowniku.

Model, który opracowano do symulacji jest opisem ruchu grudki w płaszczyźnie prostopadłej do osi rynny. W czasie analizy założono, że rynna wykonuje drgania kołowe w płaszczyźnie prostopadłej do jej osi, a grudka jest podrzucana w tej płaszczyźnie. Symulacja ta opiera się na rozważaniach z pracy [1] z tą różnicą, że uwzględniono dwie składowe prędkości (x – oś pozioma, y – oś pionowa). Dodatkowo w modelu uwzględniono przesunięcie początkowe grudki w prawą stronę o wartość Δx .



Rys. 3. Model podrzucania grudki w rynnie

Fig. 3. Model tossing lumps in the gutter

W programie istnieje możliwość zasymulowania trzech wartości promienia rynny 125 [mm], 100 [mm] i 75 [mm], czyli takie jakie posiadał grudkownik, na którym wykonywane będą badania. Średnicę grudki przyjęto 20 [mm], co jest zgodne z przeciętną wielkością grudek otrzymywanych w badaniach. Parametry symulacji ustawiono na podstawie wstępnych analiz. Dokładność próbkowania ustawiono na 0,1 [ms] co stanowiło ok. 1/10000 cyklu drgań. Taka precyzja próbkowania dała wystarczającą dokładność symulacji, a sama symulacja nie trwa zbyt długo.

Zasada działania programu symulacyjnego jest następująca:

program symulacyjny w każdej chwili czasu wylicza:

- położenie rynny w dwóch osiach:

$$\begin{aligned}x_r &= A \sin(\omega t + \pi/2), \\y_r &= A \cos(\omega t + \pi/2),\end{aligned}$$

- prędkość rynny:

$$\begin{aligned}v_{xr} &= A \omega \cos(\omega t + \pi/2), \\v_{yr} &= -A \omega \sin(\omega t + \pi/2),\end{aligned}$$

- przyspieszenie rynny:

$$\begin{aligned}a_{xr} &= -A \omega^2 \sin(\omega t + \pi/2), \\a_{yr} &= -A \omega^2 \cos(\omega t + \pi/2).\end{aligned}$$

Następnie oblicza położenie, prędkość i przyspieszenie grudki. W tym przypadku obliczenia te uzależnione są od spełnienia warunku podrzutu. Wydzielono tu dwa sposoby obliczeń:

- W momencie, gdy nie jest spełniony warunek podrzutu ($a_y < -g$) - położenie grudki, jej prędkość i przyspieszenie jest równe położeniu, prędkości i przyspieszeniu rynny.
- W momencie, gdy nastąpi oderwanie się grudki:
 - przyspieszenie grudki wynosi:

$$a_{gx} = 0, \quad a_{gy} = -g.$$
 - prędkość:

$$v_{gx} = v_{gxp}$$

$$v_{gy} = v_{gyp} - g \cdot (t - t_p)$$
 - położenie:

$$x_g = x_p + v_{gxp} \cdot (t - t_p),$$

$$y_g = y_p + v_{gyp} \cdot (t - t_p) - g \cdot (t - t_p)^2 / 2,$$

v_{gxp}, v_{gyp} – prędkości początkowe obliczone w chwili oderwania grudki od rynny.

Od tego momentu obliczana jest odległość pomiędzy położeniem osi rynny a środkiem grudki ze wzoru:

$$odl_{sr} = \sqrt{(x_{sr} - x_g)^2 + (y_{sr} - y_g)^2}.$$

Następnie sprawdzamy warunek zetknięcia grudki z rynną:

$$odl_{sr} < R_{rynny} - r_{grudki}.$$

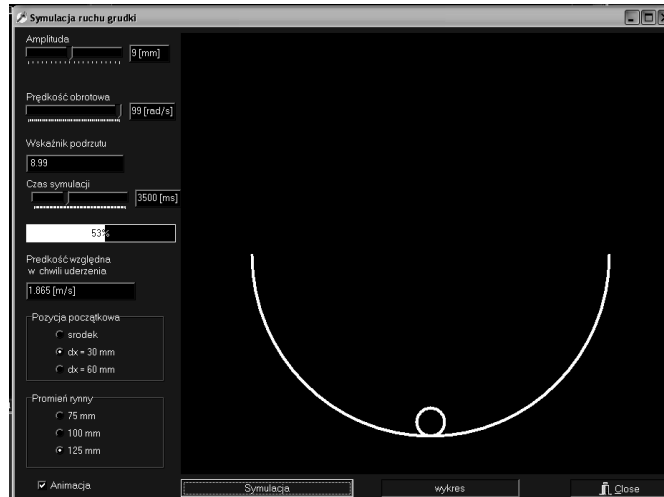
W momencie, gdy nastąpi zetknięcie grudki z rynną przerywamy symulację i obliczamy prędkość względną ze wzoru:

$$v_{wzg} = \sqrt{(v_{xg} - v_{xr})^2 + (v_{yg} - v_{yr})^2}.$$

Wartość tej prędkości zostaje zapamiętana w tablicy.

Przykładowy zrzut z ekranu programu symulacyjnego pokazano na rys. 4. Program do symulacji umożliwiał ustawienie stałej amplitudy drgań rynny grudkownika, której regulacja jest możliwa w zakresie od 1 do 20 [mm] ze skokiem 1 [mm] przy pomocy suwaka. Określono również położenie początkowe grudki w osi rynny lub na jej ściankach. Możliwa jest zmiana promienia rynny. Dodatkowo określano maksymalny czas trwania pojedynczego cyklu drgań. W trakcie jednej serii symulacji zmieniano płynnie częstotliwość drgań rynny w zakresie od 20 do 100 [rad/s] ze skokiem 1 [rad/s]. Dzięki takim parametrom mogliśmy uzyskać wskaźnik podrzutu w granicach od $u_2 = 0,5 \div 20$ (przy najwyższej amplitudzie). Dla niższych amplitud maksymalny wskaźnik podrzutu otrzymywany w czasie jednej serii jest ograniczony wzorem :

$$u_{2max} = \frac{A \cdot \omega_{max}^2}{g} = \frac{A \cdot 100^2}{9,81} = 1019,4 \cdot A$$



Rys. 4. Ekran programu symulacyjnego

Fig. 4. Screen simulation program

Program umożliwia pracę w dwóch trybach z obserwacją ruchu grudki lub z wyłączoną animacją. W drugim trybie program działa dużo szybciej przez co znacznie skraca czas otrzymania wyników. Czas trwania jednego cyklu jest ograniczony na dwa sposoby:

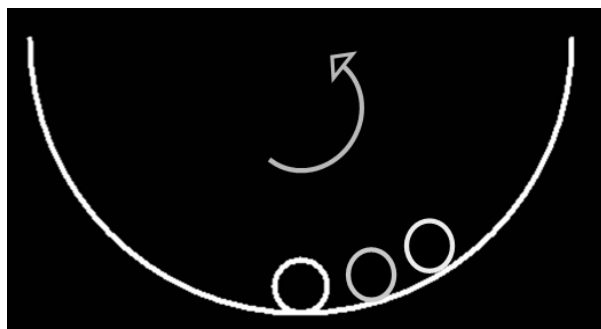
- w pierwszym przypadku czasem określonym przez operatora (nastąpi to tylko w sytuacji, gdy parametry dynamiczne grudkownika nie spowodują podrzutu grudki),
- w pozostałych sytuacjach przerwanie cyklu następuje w momencie, gdy grudka zderzy się z rynną.

Dla każdego badania program oblicza prędkość względną grudki i rynny w momencie zderzenia. Prędkość ta wraz ze wskaźnikiem podrzutu dla jakiego ta sytuacja wystąpiła zapisywane są w tabeli. Po zakończeniu całej serii symulacji możemy uzyskać wykres tych zależności.

3 Przeprowadzone symulacje

Symulację przeprowadzono dla pojedynczej grudki, którą usytuowano w różnych położeniach początkowych (rys. 5):

- w środkowym położeniu grudki – centralnie na dnie rynny (pierwsza od lewej),
- przesunięta początkowo grudka o 30 [mm] w prawo od osi rynny,
- przesunięta początkowo grudka o 60 [mm] w prawo od osi rynny.



Rys. 5. Położenia początkowe grudki

Fig. 5. The positions of the initial clumps

Pozostałe parametry symulacji były następujące:

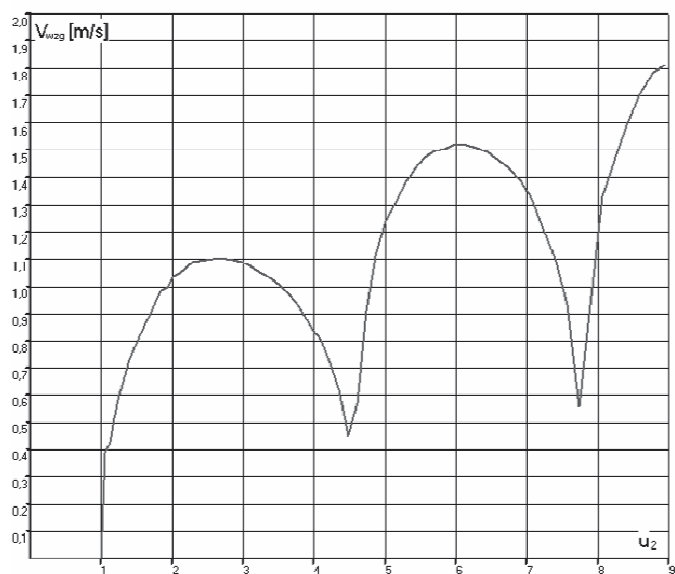
- amplituda $A = 9$ [mm],
- częstotliwość drgań $\omega = 20 \div 100$ [rad/s],

co umożliwiło przeprowadzenie symulacji wskaźnika podrzutu w zakresie

$$\text{od } u_{2\min} = \frac{A \cdot \omega_{\min}^2}{g} = 0,37 \text{ do } u_{2\max} = \frac{A \cdot \omega_{\max}^2}{g} = 9,17,$$

promień rynny 125 [mm] – rynna podstawowa.

Wynik symulacji dla środkowego położenia grudki pokazano na wykresie 6.



Rys. 6. Środkowe położenie początkowe grudki

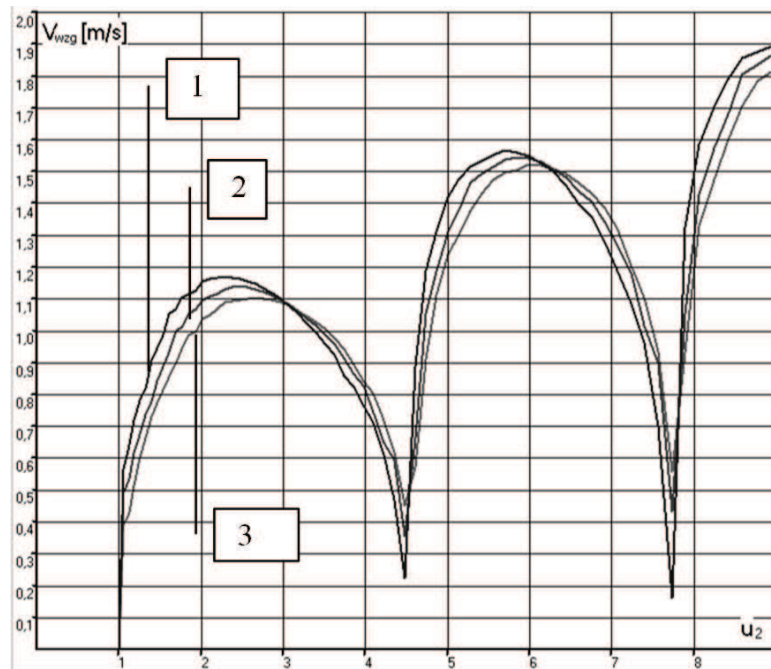
Fig. 6. The central location of the initial clumps

Dla zobrazowania zmian pokazano wyniki symulacji dla trzech przesunięć grudki na jednym wspólnym wykresie (rys. 7).

Jak można zauważyć, zmiana początkowego położenia grudki na prawą ściankę ma wpływ na położenia maksymalnych wartości prędkości względnej. Dla środkowego położenia wartości te występują dla wskaźników podrzutu $u_2 = 2,9$ i $6,2$ co jest zgodne z wcześniejszymi rozważaniami. W drugim przypadku (przesunięcie o 30 mm) te maksima występują dla $u_2 = 2,5$ i 6 , a w trzecim przypadku (przesunięcie o 60 mm) dla $u_2 = 2,4$ i $5,7$.

Z wykresu tego wynika, że optymalne wskaźniki podrzutu są niższe od wartości otrzymanych w czasie analizy podrzutu grudki na płaskiej powierzchni opisanej w pracy [1]. Symulacja ta pokazuje, że:

- w porównaniu z wcześniejszą analizą [1] uwzględnienie zakrzywienia rynny w niewielkim stopniu wpływa na zmianę położenia optymalnych wskaźników podrzutu (zmiana z wartości 3 na 2,9 oraz z 6,3 na 6,2) (rys. 6),
- uwzględnienie dodatkowo nieśrodkowego początkowego usytuowania grudki w rynnie wpływa na wyraźne przesunięcie optymalnych wskaźników podrzutu (z 2,9 na 2,4 i z 6,2 na 5,7) (rys. 7) .

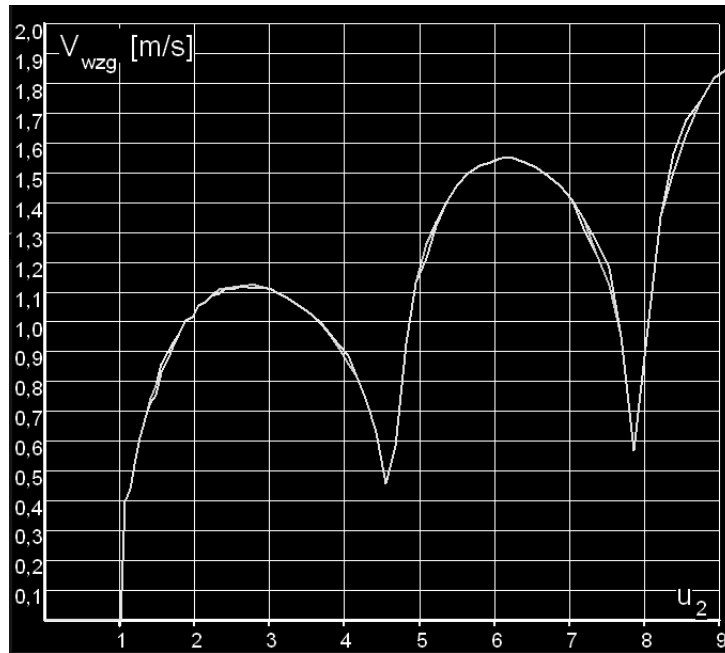


Rys. 7. Wspólny wykres dla trzech położen początkowych grudek: 1- środkowe położenie początkowe grudki, 2- przesunięta grudka o 30 mm, 3 – przesunięta grudka o 60 mm

Fig. 7. Joint plot for the three lumps of initial positions: 1 - middle initial position papules, 2 - delayed papule 30 mm, 3 - delayed papule 60 mm

4 Badania symulacyjne dla różnych średnic rynny

Drugim etapem było poszerzenie badań symulacyjnych, w których uwzględniono różne promienie rynny. Symulacje przeprowadzono dla pojedynczej grudki dla trzech różnych średnic rynny (rynna o promieniu 125 [mm], rynna 100 [mm] i rynna 75 [mm]). W pierwszym etapie grudka znajduje się w środkowym położeniu początkowym (rys. 8).



Rys. 8. Wykres zależności prędkości względnej od wskaźnika podrzutu dla trzech promieni rynny i środkowego położenie grudki

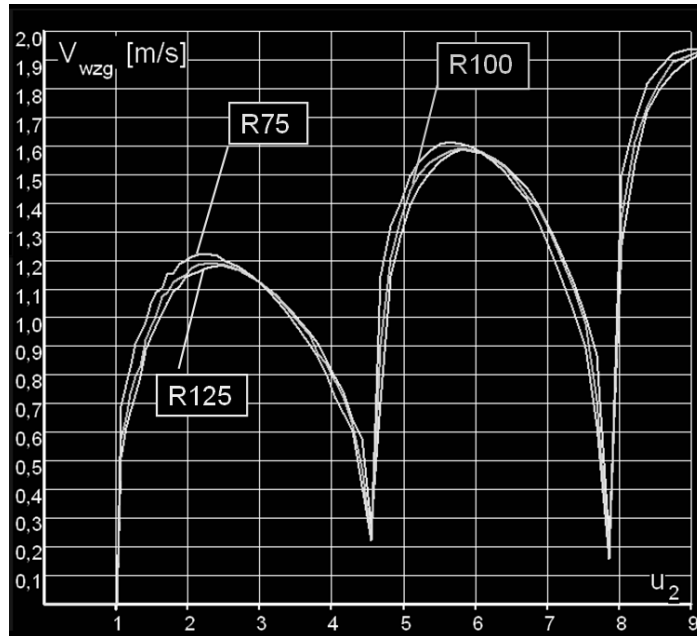
Fig. 8. Graph of the relative velocity of the ejection rate for the three rays gutters and central location of the pellet

Jak widać z przedstawionego wykresu dla środkowego położenia początkowego grudki krzywe się pokrywają. Wynika z tego, że w takim przypadku promień rynny nie ma większego wpływu na prędkość względną grudki i rynny w chwili zderzenia.

Drugi rozpatrywany przypadek dotyczy położenia na ścianie rynny przy przesunięciu $\Delta x = 30$ mm (rys. 9).

W tym przypadku możemy zauważyć pewne przesunięcie maksymalnych wartości prędkości. Przesunięcie to jest bardziej związane z tym, że wartość Δx wynosząca 30 mm, jest proporcjonalnie większa dla rynny o $R=75$ mm niż dla rynny o promieniu $R=125$ mm.

W celu weryfikacji badań symulacyjnych przeprowadzono badania doświadczalne, których wyniki pokazano w tabeli 1.



Rys. 9. Wykres zależności prędkości względnej od wskaźnika podrzutu dla trzech promieni rynny i środkowego położenie grudki

Fig. 9. Graph of the relative velocity of the ejection rate for the three rays gutters and central location of the pellet

Tabela 1. Wyniki badań grudek

Table 1. The results of lumps

Promień rynny R [mm]	Stopień wypełnienia ϕ [%]	Średnica grudki [mm]	Średnia siła niszcząca grudki [N]	Średnia przeliczeniowa siła niszcząca grudki [N]
75	10,8	8	2,5	8,2•
75	14,3	15	5,0	7,3•
100	10,8	10	3,5	8,6•
100	14,3	20	7,3	7,3
125	10,8	20	8,2	8,2
125	14,3	20	7,6	7,6

• - Średnia przeliczeniowa siła niszcząca grudki przeliczona wg wzoru dla grudek o średnicy 20 [mm] (praca [4]).

5 Wnioski

Symulacja ta analizuje pojedynczą grudkę, a nie jak to jest w rzeczywistości warstwę materiału, co jest znacznym uproszczeniem. Wyniki jednak można odnieść do warstwy, ponieważ jak zaobserwowano warstwa materiału w trakcie grudkowania przemieszcza

się na ściankę rynny. Z tego wynika, że poszczególne grudki również są przesunięte o Δx od osi rynny. Można przyjąć zatem, że wystąpi ogólna tendencja przesunięcia optymalnych wskaźników podrzutu ku niższym wartościom, co zostało potwierdzone badaniami [1, 2]. Nie stwierdzono natomiast wyraźnego wpływu promienia rynny na wytrzymałość grudek (tabela 1). Siła niszcząca grudki o średnicy 20 [mm] oscyluje wokół wartości 7,5 [N], a średnie odchylenie od tej wartości wynosi 8 %.

Literatura

1. Banaszewski T., Filipowicz A., Feliks J.: *Dobór parametrów drgań dla grudkownia wibracyjnego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Nr 28, Łódź 2000.
2. Banaszewski T., Filipowicz A., Feliks J.: *Badania grudkowania w rynnowym grudkowniku wibracyjnym w sposób ciągły*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, Nr 3/2003. Gliwice 2003.
3. Banaszewski T.: *Przesiewacze*. Wyd. Śląsk, Katowice 1990.
4. Feliks J.: *Porównywanie wytrzymałości granulek o różnych średnicach*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, Gliwice 2006.
5. Patent PL nr 197521. *Wibracyjny grudkownik rynnowy*.

Streszczenie

W Katedrze Maszyn Górniczych Przerobczych i Transportowych skonstruowano rynnowy grudkownik wibracyjny. Wstępne badania grudkowania wykazały wyraźną zależność pomiędzy parametrami kinematycznymi a wytrzymałością grudek na ściskanie. Aby wyjaśnić te zależności wykonano badanie symulacyjne pracy tego typu grudkownika. W badaniach pokazano zależności pomiędzy wskaźnikiem podrzutu a prędkością względną grudki i grudkownika w trakcie zderzenia dla różnych amplitud drgań i jak również trzech średnic rynny. Wyniki symulacji te pozwalają na określenie najkorzystniejszych parametrów grudkowania. Symulacje zostały porównane z badaniami na laboratoryjnym stanowisku badawczym.

The simulation of pellets motion in the novel vane vibratory pelleter

Summary

The target of researches was determination of dependence between toss indicator and reliability of fabricated pellets. The max value was obtained by lowest value of indicator then stem from theoretical consideration. Probably the difference maybe brought by shape of vane. The exact analysis by used the simulation of pellets motion in pelleter can explain causes of difference. They showed dependencies between the toss indicator and the relative speed of a lump and balling device during collision, for different vibration amplitudes and three chute diameters. The simulations were compared with researches conducted on a laboratory balling vibration chute.