

**Kazimierz FURMANIK, Michał PRĄCIK**

Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

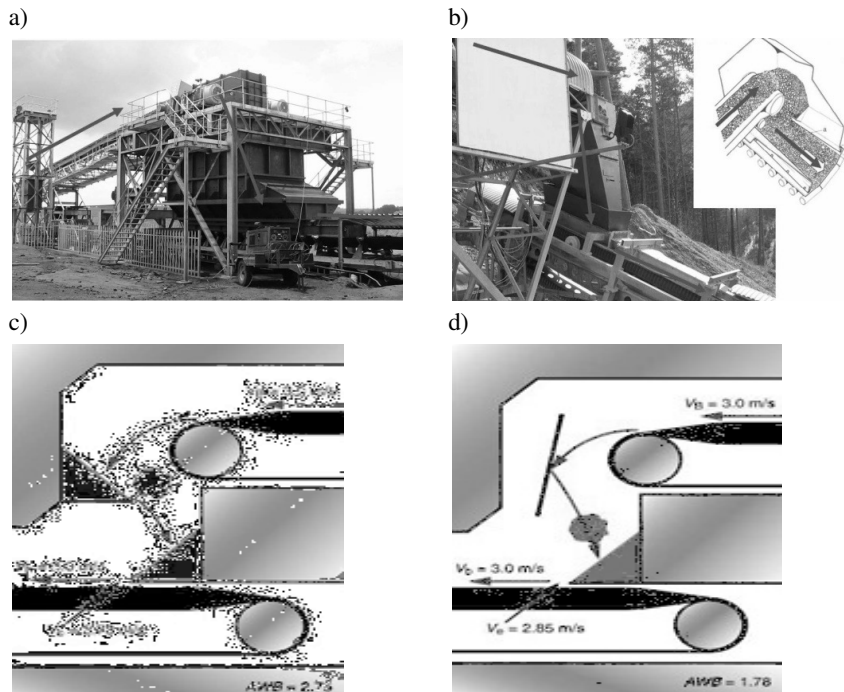
Politechnika Krakowska, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

E-mail: fukaz@agh.edu.pl, pracik@mech.pk.edu.pl

## Symulacyjne badania ruchu materiału ziarnistego w przesypie przenośnikowym

### 1 Wstęp

W kopalnianych systemach przenośnikowych stosuje się przesypy równoległe bądź kątowe, w których struga zmienia kierunek ruchu [1,5,8]. Konstrukcja przesypu powinna zapewnić ruch strugi urobku w sposób zapewniający możliwie małą stratę jej energii oraz małe ścieranie elementów przesypu, ziaren materiału, a zwłaszcza taśmy przenośnika odbierającego. Struga urobku jest najczęściej kierowana z przenośnika podającego na przenośnik odbierający bezpośrednio bądź z wykorzystaniem płyt odbojowych lub zsuwni prostych (rys. 1) [2,3,5-8].



Rys.1. Widok przesypów: a) równoległego; b) kąтового; c) typu rock box-rock box; d) typu odbojnica-rock box (po prawej) [6,7]

Fig.1. View of dumping kinds: a) parallel; b) angular; c) rock box-rock box type; d) guard timber-rock box (on the right) [6,7]

W celu obniżenia kosztów eksploatacji przenośników taśmowych poszukuje się energooszczędnych rozwiązań także przesypów przez taką ich konstrukcję, która umożliwi zmniejszenie oporów ruchu strugi, rozdrabniania ziaren i zapylenia, zużycia elementów oraz uniemożliwi ich blokowanie. W artykule przedstawiono wyniki teoretycznej analizy ruchu ziarna w przestrzeni przesypowej oraz badań eksperymentalnych i symulacyjnych ruchu warstwy ziaren, przeprowadzonych z wykorzystaniem szybkiej kamery oraz metody elementów dyskretnych (DEM); mogą one być wykorzystane w doskonaleniu konstrukcji przesypów.

## 2 Analiza ruchu ziarna w przesypie

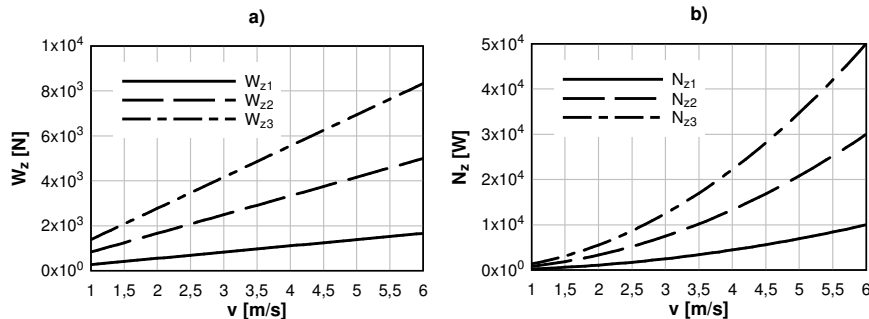
W przypadku podawania strugi urobku stycznie na taśmę przenośnika odbierającego z prędkością równą jej prędkości, nie występuje uderzenie, dodatkowy opór ani poślizg urobku oraz zużycie ściernie taśmy. W najmniej korzystnym przypadku podawania strugi urobku z wydajnością  $Q$  [t/h] prostopadle na taśmę przenośnika odbierającego o prędkości  $v$  [m/s], oprócz dynamicznych obciążeń taśmy i krążników, występuje poślizg niszczący taśmę oraz dodatkowy opór, który wynosi [5,8]:

$$W_z = \frac{Q \cdot v}{3,6} \text{ [N]}, \quad (1)$$

a tracona moc:

$$N_z = W_z \cdot v = \frac{Q \cdot v^2}{3,6} \text{ [W]}. \quad (2)$$

Przykładowo przy wydajności przenośnika  $Q_{1-2,3} = 1000; 3000; 5000$  [t/h] oraz prędkości taśmy  $v = (1 \div 6)$  m/s uzyskano wyniki przedstawione na rysunku 2 [3].

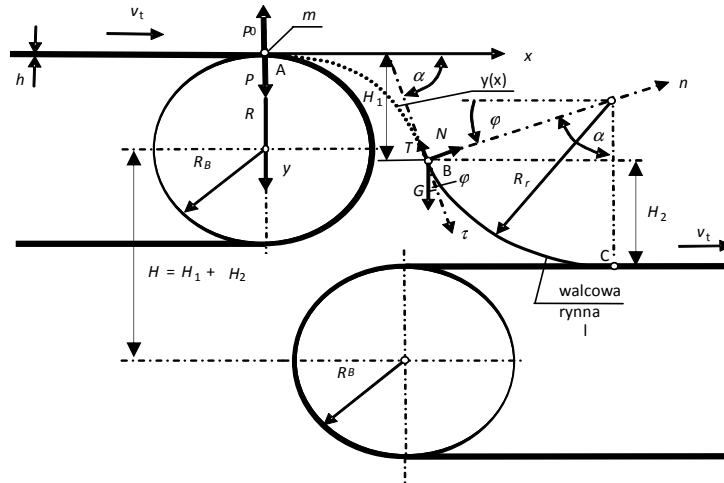


Rys. 2. Wykresy zależności: a)  $W_z$  1-2-3( $v$ ); b)  $N_z$  1-2-3( $v$ )

Fig. 2. Diagrams of dependences: a)  $W_z$  1-2-3( $v$ ); b)  $N_z$  1-2-3( $v$ )

Na rysunku 2 widać, że dodatkowy opór  $W_z$  oraz tracona moc  $N_z$  w pojedynczym przesypie mogą być znaczne i ze wzrostem liczby przesypów rosną one wielokrotnie, powodując zwiększenie energochłonności. W celu obniżenia energochłonności transportu i zużycia taśmy w przesypach należy poszukiwać lepszych rozwiązań w oparciu o analizę ruchu urobku. Dla najprostszego przypadku równoległego układu poziomych przenośników (rys. 3) analizowano ruch pojedynczego ziarna, a uzyskane z analizy [4] zależności na parametry ruchu ziarna w strefie spadku

swobodnego oraz załadunku mogą być przydatne w modernizacji konstrukcji elementów przesypów dla wyeliminowania bądź ograniczenia ich wad.



Rys. 3. Schemat przyjęty do analizy ruchu ziarna w przesypie równoległym  
 Fig. 3. Scheme assumed to the grain movement analysis into parallel dumping

Aby nastąpiło oderwania się ziarna w punkcie A (rys. 3), prędkość taśmy musi spełniać zależność:

$$v_t \geq \sqrt{Rg} = v_{gr} \quad (3)$$

gdzie:  $g$  [m/s<sup>2</sup>] – przyspieszenie ziemskie,  
 $v_t$  [m/s] – prędkość taśmy (przenośnika podającego i odbierającego),  
 $R$  [m] – promień zewnętrznej powierzchni taśmy na bębnie zrzutowym:

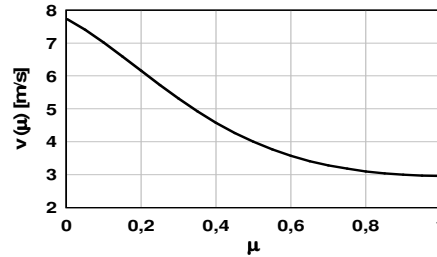
$$R = R_B + h_t \quad (4)$$

przy czym:  $R_B$  – promień bębna;  $h_t$  – grubość taśmy.

W pracy [3] analizowano układ dwóch przenośników w przesypie równoległym i wpływ ich kątów nachylenia  $\beta_1, \beta_2$  względem poziomu, prędkości przenośnika podającego  $v_1$  oraz wysokości  $H$  przesypu na wartość prędkości stycznej w chwili uderzenia ziarna o taśmę przenośnika odbierającego. Uzyskane wyniki wykazały, że dominujący wpływ na prędkość styczną ziarna w punkcie jego upadku na taśmę przenośnika odbierającego mają kąt jego nachylenia  $\beta_2$  i prędkość  $v_1$  taśmy przenośnika podającego. Natomiast w pracy [4] dla znanych wartości: prędkości wlotowej do rynny kierunkowej  $v_0$ , kąta  $\alpha$  i promienia łuku rynny  $R_r$ , oraz współczynnika tarcia ziarna o rynnę  $\mu$ , współczynnika tarcia ziarna o taśmę  $\mu_\tau$  wyznaczono prędkość zsuwania się ziarna  $v$  na końcu tej rynny, tj. w punkcie C (rys. 3), którą opisuje wzór:

$$v = \sqrt{v_0^2 - R_r g \frac{2-4\mu^2}{1+4\mu^2} (\cos \alpha - \sin \varphi) - \frac{6\mu g R_r}{1+4\mu^2} (\sin \alpha - \cos \varphi)} . \quad (5)$$

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowo wykres zależności  $v(\mu)$ .



Rys. 4. Wykres zależności  $v(\mu)$  przy:  $\alpha = 80^\circ$ ;  $v_0 = 5,76 \text{ m/s}$ ;  $H = 3,0 \text{ m}$ ;  
 $R_r = 1,647 \text{ m}$ ;  $\varphi = 90^\circ$

Fig. 4. Graph of dependence  $v(\mu)$  at:  $\alpha = 80^\circ$ ;  $v_0 = 5,76 \text{ m/s}$ ;  $H = 3,0 \text{ m}$ ;  
 $R_r = 1,647 \text{ m}$ ;  $\varphi = 90^\circ$

W celu ograniczenia ścierania rynny i ziaren urobku oraz uzyskania możliwie dużej jego prędkości na wylocie z rynny zaleca się przyjmować możliwie duże wartości

parametru  $H_1 = \frac{(v_t \text{tg } \alpha)^2}{2g}$ , a zatem i kąta  $\alpha$ , ale o takiej wartości, aby  $H_2 = H - H_1 > 0$ ;

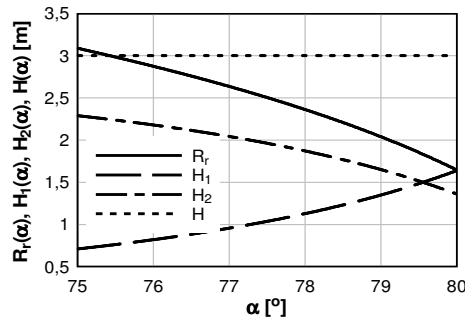
musi być więc spełniony warunek:

$$\alpha \leq \arctg\left(\frac{1}{v_t} \sqrt{2gH_1}\right) . \quad (6)$$

Promień łuku rynny w części wylotowej określa zależność (7):

$$R_r = \frac{1}{1 - \cos \alpha} \left[ H - \frac{v_t^2 \text{tg}^2 \alpha}{2g} \right] , \quad (7)$$

a jej wykresy przedstawia rysunek 5:



Rys. 5. Wykresy zależności  $R_r(\alpha)$ ,  $H_1(\alpha)$ ,  $H_2(\alpha)$  przy:  $\alpha = 80^\circ$ ;  $v_t = 1,0 \text{ m/s}$ ;  $H = 3,0 \text{ m}$

Fig. 5. Graphs of dependences  $R_r(\alpha)$ ,  $H_1(\alpha)$ ,  $H_2(\alpha)$  at:  $\alpha = 80^\circ$ ;  $v_t = 1,0 \text{ m/s}$ ;  $H = 3,0 \text{ m}$

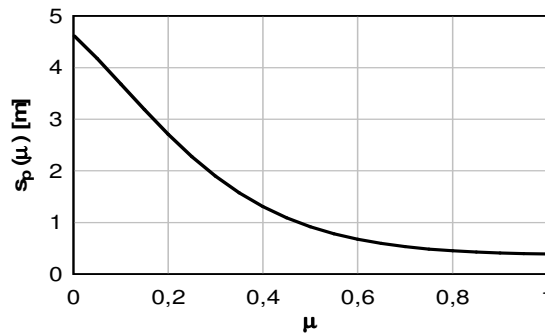
Prędkość poślizgu ziarna  $v_p = v_t - v$  zależy od współczynnika tarcia  $\mu$  oraz od promienia  $R_r$  i gdy jej wartość jest ujemna, to ziarno może przekazywać impuls siły zmniejszający opór taśmy przenośnika odbierającego. Energia kinetyczna ziarna  $E_{kz} = \frac{1}{2}mv_p^2$  jest przekazywana taśmie poziomego przenośnika odbierającego poprzez siłę tarcia  $T_z = \mu_z mg$  i o wartość tej siły opór ruchu taśmy będzie zmniejszony przy  $v_p < 0$ , a zwiększony – przy  $v_p > 0$ . Drogę poślizgu ziarna  $s_p$  po taśmie można wyznaczyć z zależności:

$$E_{kz} = T_z s_p \Leftrightarrow \frac{1}{2}mv_p^2 = mg\mu_z s_p, \quad (8)$$

skąd:

$$s_p = \frac{v_p^2}{2g\mu_z} = \frac{1}{2g\mu_z} \left( v_t - \sqrt{v_0^2 - R_r g \frac{2-4\mu^2}{1+4\mu^2} (\cos\alpha - \sin\phi) - \frac{6\mu g R_r}{1+4\mu^2} (\sin\alpha - \cos\phi)} \right)^2, \quad (9)$$

a wykres zależności (9) przedstawiono przykładowo na rysunku 6.



Rys. 6. Wykres zależności  $s_p(\mu)$  przy:  $\alpha = 80^\circ$ ;  $v_t = 1,0 \text{ m/s}$ ;  $H = 3,0 \text{ m}$ ;  $v_0 = 5,76 \text{ m/s}$ ;  $\mu_z = 0,5$ ;  $\phi = 90^\circ$

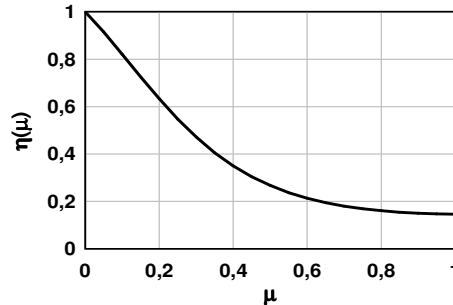
Fig. 6. Graph of dependence  $s_p(\mu)$  at:  $\alpha = 80^\circ$ ;  $v_t = 1,0 \text{ m/s}$ ;  $H = 3,0 \text{ m}$ ;  $v_0 = 5,76 \text{ m/s}$ ;  $\mu_z = 0,5$ ;  $\phi = 90^\circ$

Prędkość poślizgu ziarna  $v_p$  podawanego stycznie na taśmę przenośnika odbierającego zależy od prędkości wlotowej  $v_0$  na rynnę, prędkości taśmy  $v_t$ , współczynnika tarcia  $\mu$  oraz promienia rynny  $R_r$  i może być:  $v_p < 0$ ,  $v_p = 0$  (wtedy nie ma poślizgu i ścierania taśmy oraz ziarna) lub  $v_p > 0$ ; gdy jej wartość jest ujemna, to ziarno może siłami tarcia przekazywać impuls siły taśmie odbierającej, zmniejszając jej opór ruchu. W przypadku, gdy  $v_p \neq 0$ , to dla ograniczenia zużycia ściernego taśmy odbierającej wskazane jest wcześniejsze utworzenie na niej warstwy drobnoziarnistego urobku dzięki wykonaniu w dolnej części rynny odpowiednich palczastych wycięć.

Sprawność przesypu można wyrazić ilorazem energii ziarna na wylocie z rynny i energii, jaką by ono miało, gdyby w przesypie nie było oporu tarcia, tj.:

$$\eta = \frac{v^2}{v_i^2 + 2gH} = \frac{v_0^2 - R_r g \frac{2 - 4\mu^2}{1 + 4\mu^2} (\cos \alpha - \sin \varphi) - \frac{6\mu g R_r}{1 + 4\mu^2} (\sin \alpha - \cos \varphi)}{v_i^2 + 2gH} \quad (10)$$

Przykładowo na rysunku 7 przedstawiono wykres zależności sprawności przesypu  $\eta$  od współczynnika tarcia  $\mu$ .



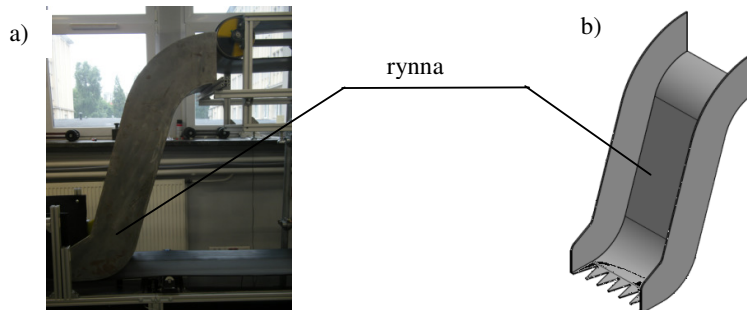
Rys. 7. Wykres zależności  $\eta(\mu)$  przy:  $\alpha = 80^\circ$ ;  $v_i = 1,0 \text{ m/s}$ ;  $H = 3,0 \text{ m}$ ;  $\varphi = 90^\circ$

Fig. 7. Graph of dependence  $\eta(\mu)$  at:  $\alpha = 80^\circ$ ;  $v_i = 1,0 \text{ m/s}$ ;  $H = 3,0 \text{ m}$ ;  $\varphi = 90^\circ$

Uzyskane z analizy teoretycznej zależności na parametry ruchu ziarna w przestrzeni przesypowej wskazują, że dla uzyskania dużej sprawności przesypu oraz ograniczenia ścierania rynny i ziaren urobku (oraz zapylenia) zaleca się przyjmować – z uwzględnieniem rzeczywistego wymiaru wysokości przesypu  $H$  – możliwie duże wartości drogi lotu swobodnego ziarna  $H_f$ , niski współczynnik tarcia  $\mu$  (przez zastosowanie odpowiednich wykładzin rynny) oraz odpowiednio duży jej promień  $R_r$  w celu uniknięcia zatorów.

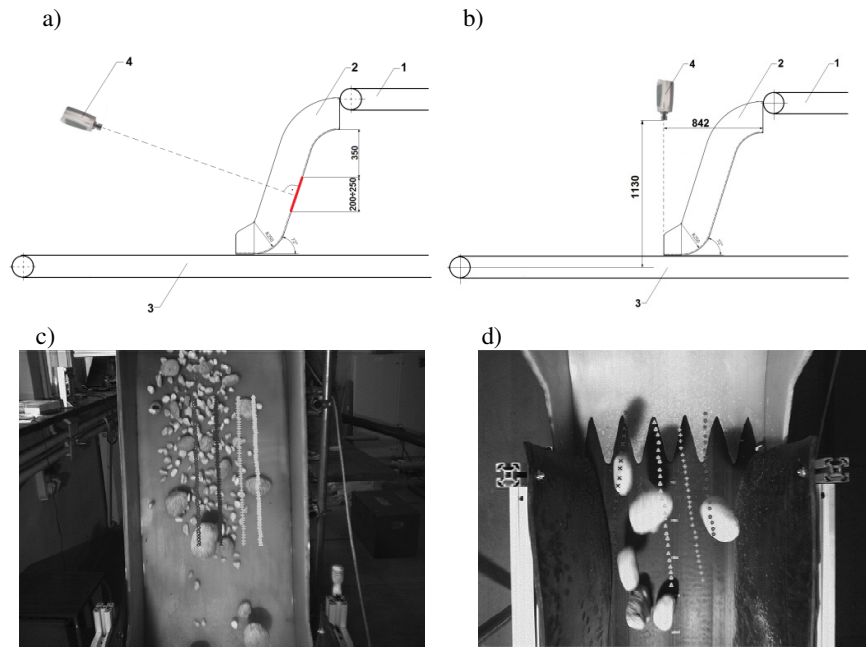
### 3 Wyniki badań laboratoryjnych i symulacyjnych ruchu warstw ziaren w rynnie

Badania te przeprowadzono na stanowisku, którego widok przedstawiono na rysunku 8, a schemat wraz z zabudową kamery - na rysunkach 9 a,b.



Rys. 8. Widok: a) przesypu; b) rynny przesypowej

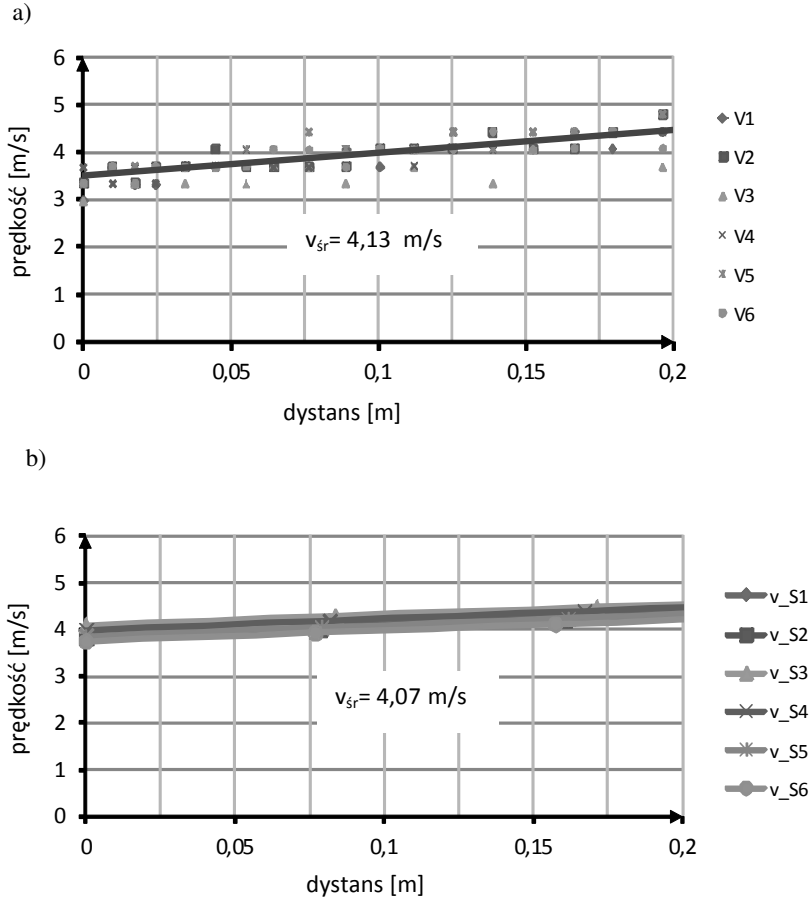
Fig. 8. View of: a) dumping; b) dumping trough



Rys. 9. Schemat stanowiska i pozycjonowanie kamery podczas pomiarów: a) na płaskim odcinku dna rynny; b) na wylocie rynny; widok obszarów roboczych: c) na płaskim odcinku dna rynny; d) w jej części końcowej; 1-przenośnik podający, 2-rywna przesykowa, 3-przenośnik odbierający, 4- szybka kamera

Fig. 9. Scheme of the stand and camera positioning during measurements: a) on a flat trough bottom segment; b) on a trough mouth; working area view: c) on a flat trough bottom segment; d) at its end part; 1-feeding conveyor, 2-dumping trough, 3-collecting conveyor, 4-camera for speed pictures

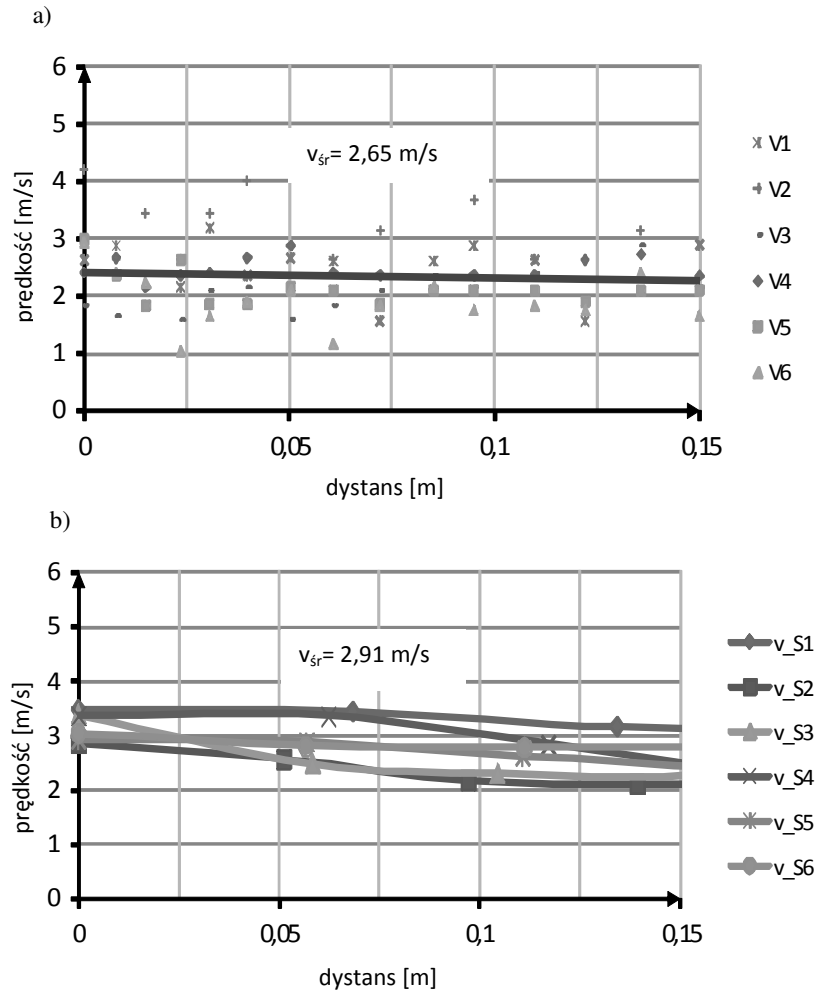
Prędkości  $v$  pojedynczych sześciu ziaren zarejestrowane szybką kamerą (typu *Olympus i-Speed LT*) z częstotliwością zapisu 200 klatek/s dla badanych obszarów roboczych przedstawiono przykładowo na rysunkach 10 i 11, a na rysunkach 12 i 13 sporządzono wykresy prędkości ruchu warstw ziaren otrzymane metodą DEM.



Rys. 10. Porównanie wyników badań prędkości ziaren (o średnicy do 40 mm) na płaskim odcinku dna rynny: a) wyniki z pomiarów przy użyciu szybkiej kamery, b) wyniki symulacji

Fig. 10. Comparison of investigation results on grain speed (of diameter to 40 mm) on a flat trough bottom segment: a) results from measurements with a use of high speed camera; b) results of simulation

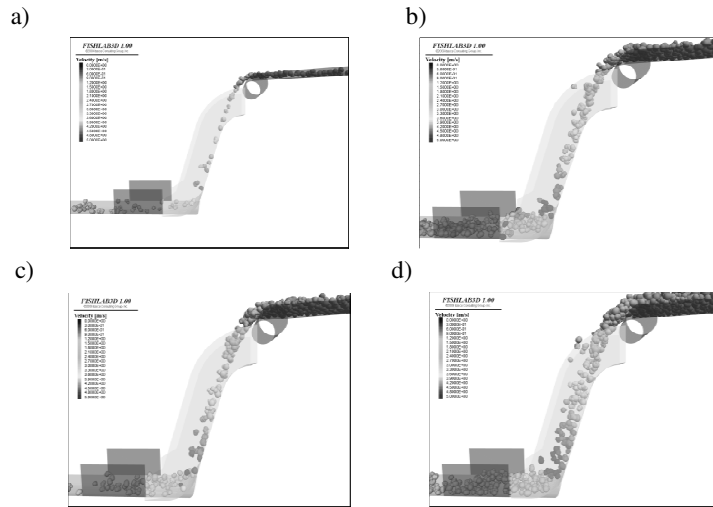




Rys. 11. Porównanie wyników badań prędkości ziaren (o średnicy do 40 mm) na wylocie rynny: a) wyniki z pomiarów przy użyciu szybkiej kamery, b) wyniki symulacji

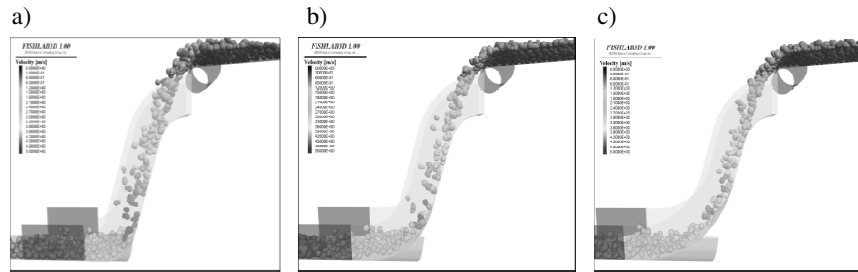
Fig. 11. Comparison of investigation results on grain speed (of diameter to 40 mm) on a trough mouth: a) results from measurements with a use of high speed camera; b) results of simulation

Na rysunku 12 przedstawiono wizualizacje symulacji numerycznych dotyczących strug ziaren o zmiennej grubości (zakres wartości prędkości: góra słupka 0 m/s, dół słupka 5 m/s).



Rys. 12. Rozkład prędkości ziaren na długości rynny przesypowej w warstwie o grubości: a) 5 cm; b) 10 cm; c) 15 cm; d) 20 cm

Fig. 12. Distribution of grain speed on a length of dumping trough into a layer of thickness: a) 5 cm; b) 10 cm; c) 15 cm; d) 20 cm



Rys. 13. Rozkład prędkości ziaren na długości rynny przesypowej przy promieniu jej łuku równym: a)  $R_r = 0,25$  m; b)  $R_r = 0,50$  m; c)  $R_r = 0,75$  m

Fig. 13. Distribution of grain speed on a length of dumping trough with its bend radius equal to: a)  $R_r = 0,25$  m; b)  $R_r = 0,50$  m; c)  $R_r = 0,75$  m

Uzyskane z pomiarów i symulacji wyniki prędkości ziaren wykazują dużą zbieżność. W końcowym odcinku rynny obserwuje się większą dynamikę współdziałania ziaren wskutek ich zagęszczania w porównaniu z płaskim odcinkiem dna rynny. Wraz ze wzrostem grubości warstwy ziaren (rys. 12) wzrasta ich zagęszczenie w końcowym odcinku rynny, a zwiększenie promienia łuku rynny w jej końcowym odcinku powoduje zmniejszenie spiętrzenia ziaren, na skutek mniejszych sił tarcia o rynnę. Przez odpowiedni dobór parametrów geometrycznych przesypu (nachylenia rynny, promienia jej łuku w części końcowej oraz współczynnika tarcia materiału wykładziny) można

ograniczyć opory ruchu ziaren i ich rozdrabnianie, a także możliwość powstawania zatorów, zapylenia i hałasu.

#### 4 Wnioski końcowe

Uzyskane z badań laboratoryjnych i symulacyjnych wyniki pozwalają na sformułowanie poniższych wniosków.

1. Wyprowadzone z analizy ruchu ziarna zależności umożliwiają odpowiedni dobór parametrów geometrycznych przesyłu (nachylenia rynny, promienia jej łuku w części końcowej oraz współczynnika tarcia - przez wybór rodzaju wykładziny) w celu zapewnienia jego dużej sprawności. Styczne podawanie strugi ziaren z rynny kierunkowej na taśmę przenośnika odbierającego zmniejsza dynamiczne oddziaływanie na nią i podpierające ją krążniki oraz obniża opory ruchu i energochłonność przenośnika, co przekłada się na wymierne efekty ekonomiczne w praktyce eksploatacyjnej kopalń.
2. Istotny i aktualny w eksploatacji górniczych przenośników taśmowych problem obniżenia energochłonności, zużycia taśm, zapylenia i rozdrabniania ziaren urobku można skutecznie rozwiązać, między innymi, przez usprawnienie konstrukcji przesyłów, w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych i symulacyjnych ruchu ziaren.
3. Eksperymentalne badania prowadzone z użyciem szybkiej kamery, jak również symulacja z wykorzystaniem metody DEM stanowią przydatne i efektywne narzędzia w racjonalnym projektowaniu przesyłów przenośnikowych systemów transportowych.
4. Względy techniczne i ekonomiczne uzasadniają potrzebę kontynuacji tych badań.

#### Literatura

1. Antoniak J.: *Systemy transportu przenośnikami taśmowymi w górnictwie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005
2. Czuba W., Kulinowski P.: Numeryczne obliczenia oporów załadunku urobku na taśmę przenośnika z wykorzystaniem metody elementów dyskretnych. *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, nr 2 (12)/2011, s. 5-10
3. Czuba W., Furmanik K.: Analysis of a grain motion in the transfer area of the belt conveyor. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, Vol. 15, No 4, 2013, pp. 390-396
4. Furmanik K.: Analiza ruchu ziarna w strefach spadku swobodnego i załadunku przesyłu przenośnika taśmowego. *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, nr 4 (22)/2013, s. 12-17
5. Gładysiewicz L.: *Przenośniki taśmowe. Teoria i obliczenia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003
6. Huque S.T.: *Analytical and Numerical Investigations into Belt Conveyor Transfers*. Engineering. University of Wollongong, 2004
7. Kessler F., Prenner M.: DEM – Simulation of Conveyor Transfer Chutes, *FME Transactions*, vol. 37, no. 4, 2009, 185–192

8. Żur T., Hardygóra M.: *Przenośniki taśmowe w górnictwie*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1979

### Streszczenie

Węzły przesypane w kopalnianych systemach transportu materiałów rozdrobnionych przenośnikami taśmowymi są miejscami potencjalnych awarii, strat energii, zwiększonego ścierania taśm i transportowanych ziaren oraz zapylenia, co wiąże się z wymiernymi kosztami, które należy obniżyć przez doskonalenie konstrukcji przesypania.

W artykule przedstawiono teoretyczną analizę ruchu ziarna w przesypaniu z uwzględnieniem oporów tarcia oraz wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych ruchu warstwy ziaren, przeprowadzonych z wykorzystaniem szybkiej kamery oraz metody elementów dyskretnych (DEM), których wyniki mogą być przydatne w projektowaniu przesypania o lepszych walorach eksploatacyjnych.

**Słowa kluczowe:** przenośniki taśmowe, przesypanie

## Simulation investigations of grain materials movement into conveyor dumping

### Summary

Dumping points in mine transport systems of bulk materials onto belt conveyors are some spots of potential failures, energy losses, increased belt and transported grain abrasion as well as dusting, what is connected with defined costs, which one ought to decrease by improvement of dumping constructions.

The article presents theoretical analysis of grain movement into dumping with the friction resistances and results of experimental and simulation investigations of grain layer movement, carried out with the use of fast camera and the discrete element method (DEM), the results of which can be useful into dumping design of better exploitation advantages.

**Keywords:** belt conveyors, transfer area

Artykuł sfinansowano w ramach projektu badawczego nr 7062/B/T02/2011/40.