

**Wojciech CZUBA, Piotr GOSPODARCZYK,  
Piotr KULINOWSKI**

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,  
Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych  
E-mail: [wczuba@agh.edu.pl](mailto:wczuba@agh.edu.pl), [piogos@uci.agh.edu.pl](mailto:piogos@uci.agh.edu.pl),  
[piotr.kulinowski@agh.edu.pl](mailto:piotr.kulinowski@agh.edu.pl)

## **Zastosowanie Metody Elementów Dyskretnych (DEM) do symulacji odstawy urobku przez ścianowy przenośnik zgrzeblowy**

### **1 Wstęp**

Zmechanizowanym kompleksem ścianowym nazywamy zespół maszyn i urządzeń do mechanicznego urabiania węgla systemem ścianowym. W skład takiego zespołu wchodzi trzy maszyny: kombajn ścianowy służący do urabiania, przenośnik zgrzeblowy służący do transportu (odstawy) urobku oraz hydrauliczna obudowa ścianowa pozwalająca na zabezpieczenie wyrobiska (rys. 1). Aby system ścianowy pracował z założoną wydajnością należy dobrać odpowiednie parametry pracy poszczególnych maszyn pozwalające na ich efektywną współpracę. Stopień skomplikowania takiego systemu jak i trudne warunki otoczenia, w którym pracują te urządzenia powodują, że sprawdzenie konkretnego rozwiązania przed wdrożeniem jest zagadnieniem niezwykle trudnym.

Współpraca kombajnu ścianowego z przenośnikiem zgrzeblowym jest jednym z szeregu analizowanych zagadnień. Przy określonych wstępnie parametrach eksploatacji ściany, wpływ na współpracę tej pary maszyn mogą mieć takie czynniki jak:

- prędkość ruchu ciągła i rozstaw zgrzebeł
- konstrukcja rynny i zastawki oraz ich parametry geometryczne
- prędkość posuwu kombajnu względem przenośnika
- prędkość obrotowa i średnica organu urabiającego decydująca o wydajności ładowania na przenośnik
- warunki geologiczne związane z własnościami węgla (twardość)
- warunki geologiczne związane z rozcinką złoża (parametry geometryczne ściany).

Charakterystyki mechaniczne pracy maszyn oraz ich rozwiązania konstrukcyjne w większości przypadków dobiera się w oparciu o doświadczenia z poprzednich realizacji tego typu obiektów. Można oczywiście przeprowadzać badania doświadczalne w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, należy jednak pamiętać, że koszty takiego przedsięwzięcia są bardzo wysokie. W rozważaniach współpracy kombajnu z przenośnikiem istotne jest także to, w jaki sposób zachowywać się będzie urabiany

i transportowany materiał. Należy pamiętać, że materiał sypki to discontinuum. Urobek stanowi ośrodek w przybliżeniu ciągły, ale o niejednorodnej strukturze i składzie, a co za tym idzie o trudnych do ustalenia wartościach nawet takiej podstawowej własności jak kąt tarcia wewnętrznego, czy też ruchowy kąt naturalnego usypu. Stosowanie metod analizy takich ośrodków w oparciu o klasyczną mechanikę continuum, pomimo wielu dobrze sprawdzających się teorii, jest ograniczone.



Rys. 1. Zmechanizowany kompleks ścianowy  
Fig. 1 Mechanized longwall system

Jedną z metod usprawnienia procesu projektowania przenośników zgrzeblowych jest możliwość wykorzystania symulacji komputerowych do analizy zachowania się urobku podczas transportu. Dzięki temu można zamodelować i zweryfikować dane rozwiązanie, co w przypadku obliczeń analitycznych byłoby bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

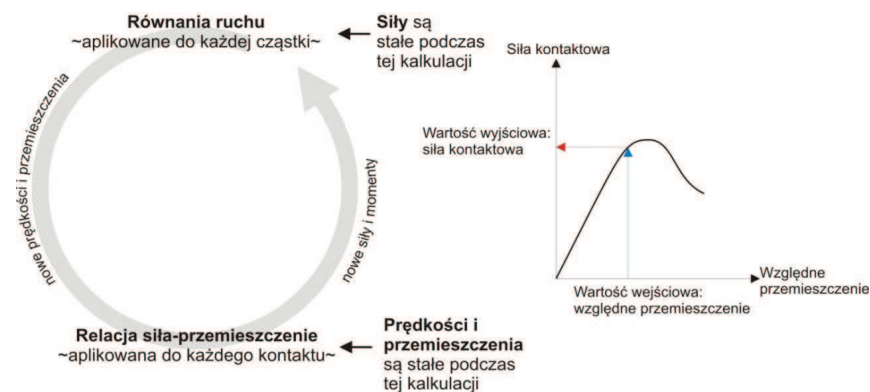
## 2 Metoda Elementów Dyskretnych

Jedną z metod numerycznych pozwalającą na efektywną symulację materiałów sypkich jest Metoda Elementów Dyskretnych sformułowana w 1971 roku przez P.A. Cundalla. W roku 1979 została zaimplementowana do analizy mechaniki materiałów sypkich. Ze względu na dużą czasochłonność obliczeń, dopiero w przeciągu ostatnich 10 lat, metoda ta zaczęła zyskiwać na znaczeniu, dzięki dynamicznemu rozwojowi możliwości obliczeniowych komputerów. Metoda elementów dyskretnych (Discrete Element Method – DEM) umożliwia modelowanie układów fizycznych składających się z bardzo wielu odrębnych, oddziałujących na siebie elementów. Dzięki temu możliwe jest bezpośrednie zastosowanie praw dynamiki Newtona. Cykl kalkulacji przedstawiony na rys. 2 składa się z dwóch zależnych od siebie algorytmów rozwiązujących dwa typy równań:

1. ruchu – aplikowane do każdej cząstki, pozwalają na obliczenie przemieszczeń elementów będących wynikiem oddziaływania na nie sił zewnętrznych
2. konstytutywne – obliczanie sił działających na elementy będące w kontakcie (których charakterystyka zależy od modelu kontaktu dobranego przez użytkownika).

W obydwu przypadkach, w trakcie rozwiązywania jednego typu równania, dane uzyskane na podstawie wcześniejszych obliczeń są znane i uznawane za stałe [12]. Dla zachowania efektywności obliczeń i pewnych uproszczeń w detekcji kontaktów, elementy reprezentowane są jako sfery lub konglomeraty sfer (w przypadku programu PFC3D). Cząstki traktowane są jako sztywne jednak mogą na siebie nachodzić, co traktowane jest jako odkształcenia kontaktowe. Z odkształceń tych z kolei wynikają kontaktowe siły sprężystości działające na elementy.

Dla odzwierciedlenia charakterystycznego zachowania się złoża należy dobrać odpowiedni model kontaktowy, w zależności od którego wypadkowa siła może mieć dodatkowe składowe uwzględniające takie zjawiska jak np. adhezja. Przykładowymi modelami kontaktowymi są: model liniowo-sprężysty, model Hertza-Mindlina (nieliniowy) model z tłumieniem wiskotycznym.



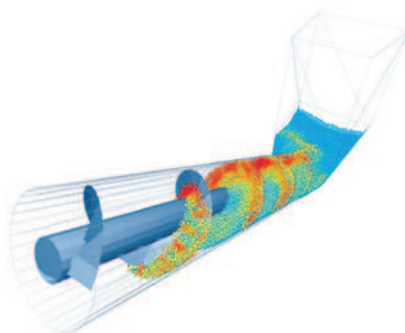
*Rys. 2. Typowy cykl kalkulacji w metodzie elementów dyskretnych (po lewej). Implementacja zależności siła-przemieszczenie (po prawej). Źródło [12]*

*Fig. 2 Typical DEM cycling algorithm (left). Implementation of force-displacement law (right). Source [12]*

Wypadkowa siła i moment działający na cząstkę, wraz z uwzględnieniem jej masy i momentu bezwładności pozwalają na wykorzystanie II prawa dynamiki Newtona do obliczenia przyspieszenia a w konsekwencji do wyprowadzenia równań ruchu. Następnie równania ruchu są integrowane dla bardzo krótkiego kroku czasowego, a element zostaje umieszczony w nowej pozycji. To z kolei powoduje konieczność uruchomienia algorytmu wykrywania nowych kontaktów (które mogły powstać po przemieszczeniu) jak również zlikwidowania już nieistniejących. Cykl kalkulacji jest powtarzany aż wymagany czas symulacji zostanie osiągnięty. Schemat typowej symulacji jest stosunkowo prosty i opiera się na trzech podstawowych etapach [11]:

1. detekcja kontaktów – skanowanie obszaru symulacji w celu wykrycia nachodzących na siebie elementów
2. aplikacja sił (prawa konstytutywne) – określenie wartości i charakteru sił działających na każdą cząstkę, w oparciu o właściwości materiału i otoczenia cząstek
3. zastosowanie II prawa dynamiki Newtona – przemieszczenie elementów w wyniku działających na nie sił.

Wyniki z symulacji dostarczają użytkownikowi szeregu istotnych danych dotyczących takich wielkości fizycznych jak naprężenia, prędkość, przemieszczenia itp., wszystkich elementów ośrodka sypkiego (rys. 3).



Rys. 3. Przykładowe wizualizacje wyników obliczeń (post-processing). Kolory elementów mogą odzwierciedlać wartości różnych parametrów. Źródło [10].

Fig. 3. Example visualization of calculation's results. Colors of elements can reflect values of various parameter. Source [10].

Dokładny opis metody można znaleźć w publikacjach opisujących podstawy metody i metodykę kalibracji parametrów [3,4,6].

### 3 Symulacje numeryczne odstawy urobku

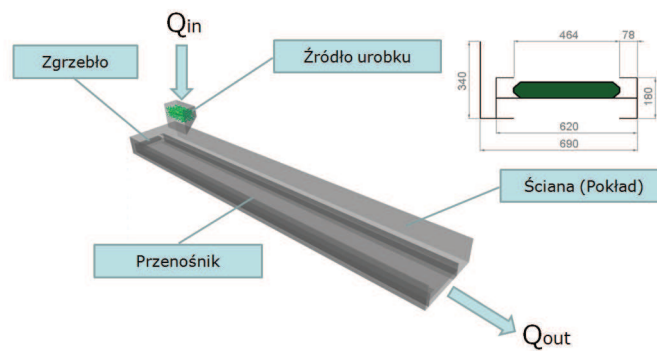
Dla celów symulacji opracowano model przenośnika zgrzeblowego. Kombajn był reprezentowany przez prostopadłościenny pojemnik z wlotem skierowanym na przenośnik. W skrzyni programowo generowane były bryły urobku, tworzone ze sferoidalnych elementów dyskretnych. Z wydajnością obliczoną na podstawie wydajności organu urabiającego, urobek był zrzucany na przenośnik. Przeprowadzenie symulacji opierało się na zrealizowaniu następujących czynności:

1. definicja celów analizy modelu
2. tworzenie koncepcyjnego schematu fizycznego układu
3. konstruowanie i wykonywanie wyidealizowanych symulacji modelu (symulacje testowe)
4. dołączenie sprecyzowanych danych
5. przygotowanie serii szczegółowych symulacji
6. przeprowadzenie obliczeń

7. prezentacja i interpretacja wyników (postprocessing).

Celem analizy było porównanie zadanej wydajności źródła urobku (imitującego punkt załadunku materiału na przenośnik zgrzeblowy przez organ urabiający kombajnu) do wydajności samego przenośnika. Dodatkowo obserwacji poddany został charakter ruchu materiału podczas transportu jak i rozkład prędkości w strudze urobku. Przeprowadzona symulacja była kolejnym krokiem w analizie pracy przenośnika zgrzeblowego o zadanych parametrach. Pierwsza część analizy wykonanej przez autorów dotyczyła ruchu materiału na rynnice przenośnika w sytuacji, gdy początkowo był on już zasypany pewną ilością urobku. Materiał tworzył określony przekrój poprzeczny na rynnice tak aby możliwa było porównanie obliczeń z wynikami opartymi na podstawowych wzorach matematycznych wykorzystywanych przy obliczaniu wydajności masowej przenośnika zgrzeblowego [5].

Schemat badanego układu prezentuje rys 4. Geometria została wykonana w zewnętrznym programie CAD, a następnie zaimportowana do programu PFC3D.



Rys. 4. Uproszczony schemat układu wykorzystany w symulacjach.

Fig. 4. Simplified schematic diagram of the system.

Tabela 1. Wybrane parametry układu

Table 1. Chosen parameters of the system

Prędkość zgrzebeł	0,8 m/s
Podziałka	0,8 m
Zastawka	0,34 m
Wydajność źródła	40 [kg/s]

Podczas przygotowywania modelu do symulacji, konieczne było wykonanie szeregu symulacji testowych. Czasochłonność obliczeń przy wykorzystaniu tej metody, sprawia, że jest to bardzo istotny punkt analizy. Należy przeprowadzić szereg testów ze wstępnymi parametrami wejściowymi, tak aby sprawdzić poprawność działania wszystkich funkcji kontrolujących algorytm symulacji. W momencie gdy użytkownik

jest pewny poprawności działania i charakteru odpowiedzi układu, należy dołączyć sprecyzowane dane i przygotować szczegółowe symulacje.

Ważnym elementem przygotowań układu jest dobranie odpowiedniego modelu kontaktowego i jego parametrów w celu odzwierciedlenia konstytutywnego zachowania się materiału transportowanego. Dotychczasowe badania i doświadczenia z wykonanych symulacji dostarczyły informacji na temat metodologii doboru odpowiednich wartości parametrów jak i ograniczeń związanych zarówno z samą metodą oraz możliwościami obliczeniowymi komputerów [6,11]. Należy zawsze brać pod uwagę efektywność obliczeń jak również czas potrzebny na ich wykonanie. Często konieczne jest skalowanie modelu poprzez zwiększanie rozmiarów cząstek i zmniejszenie wymiarów geometrycznych układu [6].

W przypadku obliczeń odstawy urobku wykorzystano model kontaktowy Herta-Mindlina. Parametry nie zostały skalibrowane laboratoryjnie tak więc możliwa jest jedynie analiza jakościowa [6]. Wartości parametrów zawarto w tabeli 2. Dodatkowo, elementem sferycznym odebrano możliwość obrotu wokół jednej z osi ponieważ w dobranym modelu kontaktu nie występuje zjawisko oporów toczenia.

Tabela 2. Charakterystyczne właściwości materiału.

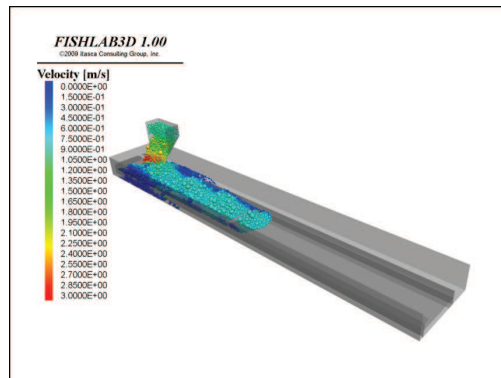
Table 2. Characteristic properties of simulated material.

Parametr	Wartość	
	Makroskopowa	Mikroskopowa
Moduł Kirchoffa G	- [GPa]	1e6 [MPa]
Liczba Poissona	0,14÷0,3	0,25
Kąt tarcia wewnętrznego	45 [°]	45 [°]
Współczynnik tarcia o stal	0,3	0,3
Współczynnik tłumienia normalnego	Nie określono	0,95 [N·s/m]
Współczynnik tłumienia poprzecznego	Nie określono	0,95 [N·s/m]
Gęstość usypowa	800-1000 [kg/m <sup>3</sup> ]	-
Gęstość właściwa	1600 [kg/m <sup>3</sup> ]	1600 [kg/m <sup>3</sup> ]
Kąt usypu naturalnego w ruchu	15÷30 [°]	Wynika z pozostałych parametrów
Rozmiar brył (średnica)	-	10 - 80 [mm]

#### 4 Przebieg i wyniki symulacji

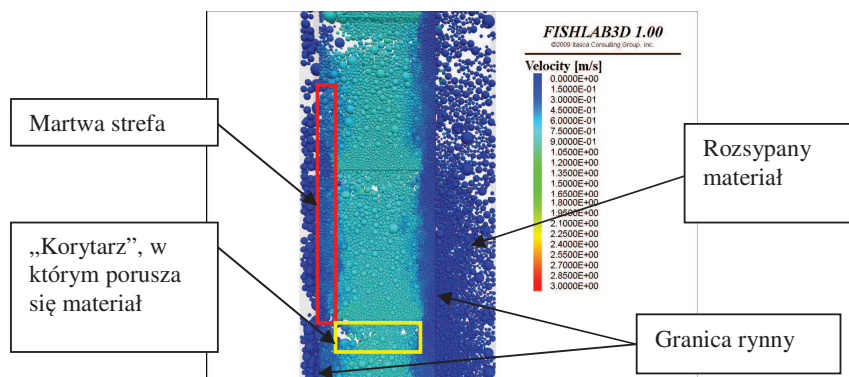
Na początku symulacji pierwsze zgrzebło znajdowało się w punkcie o współrzędnej  $x = 0$ . W miarę upływu czasu, gdy położenie pierwszego zgrzebła wynosiło  $x = 0,8$  m (podziałka), wygenerowane zostało następane.

*Zastosowanie Metody Elementów Dyskretnych (DEM)  
do symulacji odstawy urobku przez ściany przenośnik zgrzeblowy*



Rys. 5. Stan w 3 sekundzie symulacji, wypełnienie rynny i ruch materiału (kolory oznaczają prędkości).

Fig. 5 State of the system after 3 seconds of a simulation, fill level of a gutter and material motion (colours indicate velocity).

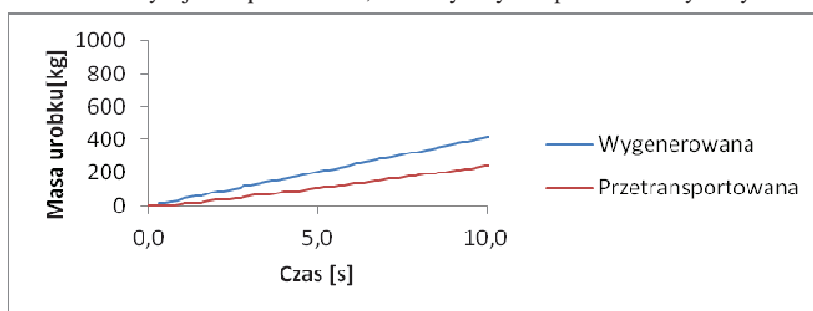


Rys. 6. Rozkład prędkości strugi urobku w trakcie symulacji transportu.

Fig. 6. Distribution of stream velocity during transport simulation.

Kolejne zgrzebła generowane były w odstępach czasowych zapewniających zachowanie podziałki. Urobek ładowany był na przenośnik w sposób ciągły. Początkowy etap załadunku i ruchu materiału na rynn timer przenośnika zgrzeblowego przedstawia rys. 5. W przypadku analiz opartych na metodzie elementów dyskretnych, zwłaszcza w odniesieniu do badania zachowania się materiałów sypkich, wizualna ocena wyników ma bardzo duże znaczenie. Niejednokrotnie, analiza jakościowa opiera się na obserwacji wyników w postaci filmu przedstawiającego przebieg czasowy symulacji. Na podstawie wyników zobrazowanych na rys. 5 można wnioskować, że wydajność źródła jest zbyt duża dla danego rozwiązania konstrukcyjnego przenośnika i jego parametrów ruchowych (szerokość rynny, wysokość zastawki, prędkość i podziałka zgrzebel). Zauważyć można, że materiał jest rozsypywany poza rynnę,

zarówno w obszarze załadunku jak i wzdłuż osi przenośnika. Efekt utraty urobku jak i charakterystyczną strefę ruchu obrazuje rys. 6. W wyniku tarcia materiału o rynnę, utworzona została strefa martwa (czerwony prostokąt, materiał nie poruszał się), transportowany materiał ukształtował „korytarz” ograniczony tą strefą (żółty prostokąt). Dodatkowym potwierdzeniem przypuszczeń na temat zbyt dużej wydajności źródła w stosunku do wydajności przenośnika, może być wykres przedstawiony na rys. 7.



Rys.7. Porównanie ilości wygenerowanego i przetransportowanego urobku.

Fig. 7. Comparison of amount of mass generated and transported.

Zauważalna jest wyraźna różnica w kącie nachylenia krzywej obrazującej ilość wygenerowanego materiału w stosunku do krzywej obrazującej ilość przetransportowanego urobku. Odzwierciedlone jest to gromadzeniem się w miarę upływu czasu co raz to większej ilości materiału w miejscu załadunku.

## 5 Podsumowanie

Przedstawione w referacie wyniki symulacji świadczą o tym, że zaproponowana metoda badawcza może być skutecznym narzędziem weryfikacji i optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych przenośników ścianowych pracujących w kombajnowych kompleksach zmechanizowanych. Może też być przydatna do weryfikacji doboru parametrów przenośnika do kombajnu urabiającego pracującego w określonych warunkach górnictwo-geologicznych. Przedstawione badania stanowią pierwszy etap szerszej zaplanowanych badań symulacyjnych ścianowych kompleksów zmechanizowanych.

## Literatura

1. Antoniak J.: *Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1990
2. Antoniak J.: *Obliczenia przenośników stosowanych w górnictwie*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1970
3. Coetzee C.J. et al. Discrete element parameter calibration and the modelling of dragline bucket filling. *J Terramechanics*, 2009
4. Coetzee C.J., Els D.N.J., Calibration of granular material parameters for DEM modeling and numerical verification by blade-granular material interaction, *Journal of Terramechanics* 46, 2009, p. 15-26
5. Czuba W., Gospodarczyk P., Kulinowski P., Wykorzystanie symulacyjnych metod obliczeniowych do analizy rozkładu prędkości strugi urobku na rynnie ścianowego



- przenośnika zgrzeblowego. *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, 3(9), 2010, str. 66-70
6. Gröger T., Katterfeld A., Application of the Discrete Element Method in Material Handling Part 1: Basics and Calibration, *Bulk Solids Handling*, vol. 27 2007 no. 1, p. 17-23
  7. Gröger T., Katterfeld A., Minkin A., Application of the Discrete Element Method in Material Handling Part 2: Screw and Shaftless Screw Conveyors, *Bulk Solids Handling*, vol. 27 2007 no. 2, p. 84-93
  8. Gröger T., Katterfeld A., Application of the Discrete Element Method in Material Handling Part 3: Transfer Stations, *Bulk Solids Handling*, vol. 27 2007 no. 3, p. 158-166
  9. Gröger T., Katterfeld A., Application of the Discrete Element Method in Material Handling Part 4: Bucket Elevators and Scraper Conveyors, *Bulk Solids Handling*, vol. 27 2007 no. 4, p. 228-234
  10. Favier J., Industrial application of DEM: Opportunities and Challenges
  11. Kruse D., Lemmon R. , *Using the Discrete Element Method as an Everyday Design Tool*
  12. [www.itascacg.com](http://www.itascacg.com)

### Streszczenie

W referacie przedstawiono możliwość wykorzystania Metody Elementów Dyskretnych do numerycznej symulacji materiału sypkiego jako discontinuum. Metoda ta pozwala na modelowanie układów fizycznych składających się z wielu odrębnych elementów przez co znalazła zastosowanie w analizie procesów mechanicznych związanych z transportem urobku na różnego rodzaju przenośnikach. W opracowaniu przedstawiono wyniki symulacji ładowania urobku na ścianowy przenośnik zgrzeblowy i proces jego odstawy. Przeprowadzona analiza pokazała, że symulacja z wykorzystaniem metody DEM może być skutecznym narzędziem dla weryfikacji doboru parametrów konstrukcyjnych i ruchowych kombajnu i przenośnika w ścianowym kompleksie zmechanizowanym.

## **Application of the Discrete Element Method (DEM) to simulate an excavated material haulage by a longwall scraper conveyor**

### Summary

This work presents the possibility of using Discrete Element Method for numerical simulation of bulk material as discontinuum. This method allows modeling of physical systems composed of many separate elements, therefore it found application in the analysis of mechanical processes associated with the transportation of excavated material on the various type of conveyors.