

# Matematyczny model pracy powietrznego stołu koncentracyjnego typu FGX\*

## 1. Wprowadzenie

Powietrzne stoły koncentracyjne znajdują coraz szersze zastosowanie w procesach wzbogacania węgla kamiennego. Nowoczesne konstrukcje stołów różnią się od tradycyjnych rozwiązań [9, 10], w których perforowana płyta robocza była ulistwiona i wykonywała ruch posuwisto-zwrotny. Nowoczesne stoły posiadają wprawdzie listwy (nazywane grzebieniami), ale jest ich kilka i są zamocowane w poprzek płyty roboczej pod pewnym kątem. W tradycyjnych stołach listwy są zamocowane w zasadzie równoległe do osi płyty roboczej, choć spotykane są ulistwienia pod kątem. Przykłady takich rozwiązań pokazano w pracy [4]. Listwy w tych rozwiązaniach ułożone są do siebie równoległe i jest ich kilkanaście bądź kilkadziesiąt. W tradycyjnych rozwiązaniach i jak już wspomniano, płyta robocza wprawiana jest w ruch posuwisto-zwrotny. W nowoczesnych rozwiązaniach płyta tylna, umocowana pod pewnym kątem do płyty roboczej, otrzymuje drgania (wibracje) od wibratora.

Schemat powietrznego stołu koncentracyjnego pokazano na rysunku 1. Przedstawiony jest na nim jedynie moduł wzbogacania. Szczegółowy opis instalacji powietrznej separacji składający się z modułów: zasilania, klasyfikacji, rozdrabniania, wzbogacania i sterowania, opisano w pracach [6, 13]. Zasadę rozdziału ziaren wg gęstości opisano w artykułach [3, 6, 10].

Powietrzne stoły koncentracyjne wdrożone w kilkunastu krajach, nazywane są technologią XXI wieku [11]. Nowoczesne powietrzne stoły koncentracyjne

powstały na przełomie XX i XXI wieku. Konstrukcję opracowała chińska firma Tangshan Shenzhou Manufacturing Group [4, 9]. Wykonano już ponad 2000 egzemplarzy o różnej wydajności (od 10 t/h do 1000 t/h). Większość tych instalacji pracuje w Chinach (ponad 1800). Prostota rozwiązań, system skutecznego odpylania urobku, niskie koszty inwestycyjne a także bardzo niskie koszty ruchowe spowodowały, że otworzono ośrodki badawcze w USA i w Australii. W Polsce, pierwsza w Unii Europejskiej instalacja została zakupiona przez IMBiGS i zmontowana na terenie ZG „Sobieski”, gdzie prowadzono pilotowe badania nad możliwością implementacji stołów w krajowych kopalniach węgla kamiennego [1, 2, 3, 7, 8, 13]. Obecnie instalacja znajduje się na terenie ZG „Janina”. Oba zakłady górnicze wchodzi w skład Tauron Wydobycie SA.

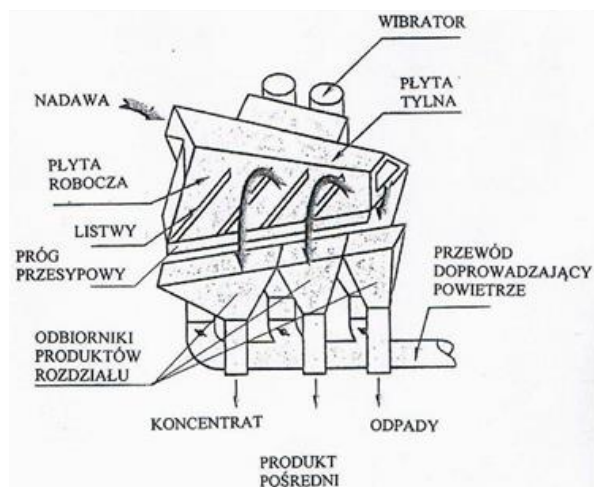
Mimo prostoty urządzenia, sam proces rozdziału ziaren według gęstości jest złożony technologicznie. Podstawy teoretyczne procesu wzbogacania oparte były dotychczas na rozważaniach prędkości opadania ziaren w powietrzu [10]. Bardziej szczegółowe rozważania nad zachowaniem się ziaren w procesie separacji prowadzono w Electromechanical Engineering College w University of Science and Technology w Kunming City prowincji Yunnan w Chinach [12].

W niniejszym artykule przytoczono rozważania nad ruchem ziarna mineralnego znajdującego się na powierzchni płyty roboczej i ziarna zawieszono w warstwie sfulidyzowanej nad powierzchnią płyty roboczej. Analizowano siły działające na ziarna oraz opracowano modele matematyczne (równania) ruchu ziaren mineralnych. Prace w tym zakresie prowadził profesor He Jianing z wymienionego uniwersytetu. Rozważania opublikowane zostały w trudno dostępnym czasopiśmie w artykule [12].

Model opracowany został na analizie ruchu ziaren w płaszczyźnie pionowej przekroju stołu. Ruch ten został pokazany na rysunku 2.

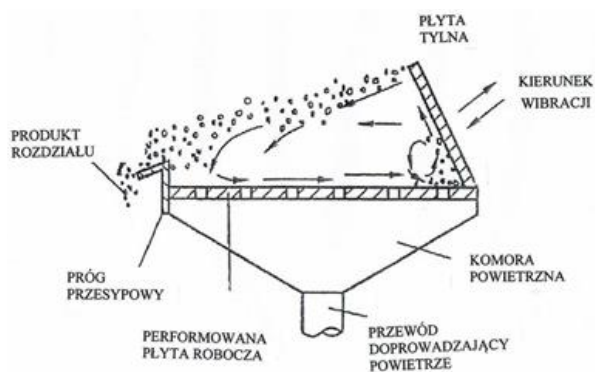
## 2. Siły działające na ziarna znajdujące się w przestrzeni roboczej powietrznego stołu koncentracyjnego

Analizę rozkładu sił działających na ziarna mineralne dokonano na przykładzie ziarna, które znajduje się na powierzchni płyty roboczej stołu (rys. 3a) lub ziarna, które jest zawieszono w warstwie fluidalnej nad powierzchnią płyty roboczej i dotyka tylną część płyty roboczej separatora (rys. 3b). Na rysunkach 3a i 3b przedstawiono przekrój poprzeczny części roboczej stołu.



Rys. 1. Schemat powietrznego stołu koncentracyjnego

\* Artykuł był opublikowany w Zeszytach Naukowych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Nr 90. Wyd. IGSMiE PAN. 2015



Rys. 2. Przemieszczanie się ziarn w płaszczyźnie pionowej przekroju stołu (przekrój prostokątny do osi płyty roboczej)

Niezależnie od miejsca położenia na ziarna mineralne działają następujące rodzaje sił:

- $G$  – siła ciężkości,
- $S$  – siła bezwładności wibracji wytworzona przez ziarna mineralne,
- $W$  – siła wyporu wznoszącego się strumienia powietrza,
- $F_x$  – składowa siły tarcia w kierunku osi  $X$ ,
- $N$  – wypadkowa sił ciężkości, bezwładności i wyporu oddziaływująca na ziarna mineralne,
- $T$  – siła naporu pochodząca od tylnej płyty stołu (zakłada się, że siła ta przenosi się na ziarna niedotykające tylnej płyty przez kontakt z innymi ziarnami będącymi w stanie zawieszenia, siła naporu ma kierunek przeciwny niż siła bezwładności),

które wyrażone są następującymi wzorami:

$$G = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \quad (1)$$

$$S = m \omega^2 \lambda \sin \varphi \quad (2)$$

$$W = \psi d^2 v^2 \rho \quad (3)$$

$$F_x = N f \quad (4)$$

$$N = G_z - W - S_z \quad (5)$$

$$T = -k \cdot S \quad (6)$$

Symbole występujące w powyższych wzorach oznaczają:

- $g$  – przyspieszenie ziemskie,
- $d$  – średnia wielkość ziarna mineralnego,
- $\rho_s$  – gęstość ziarna mineralnego,
- $\rho$  – gęstość powietrza,
- $m$  – masa ziarna mineralnego,
- $\omega$  – częstotliwość kątowna wibracji,
- $\lambda$  – amplituda wibracji,
- $\varphi$  – kąt fazowy wibracji,
- $\psi$  – współczynnik tłumienia,
- $v$  – prędkość wznoszącej strugi powietrza,
- $f$  – współczynnik tarcia,
- $k$  – współczynnik korekcyjny, o wartości:  $0 < k < 1$ .

Ponieważ płyta robocza jest ustawiona pod pewnym kątem, na ziarno oddziałują składowe tych sił działające wzdłuż osi  $X$ .

$$G_x = G \cdot \sin \alpha = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

$$S_x = S \cdot \cos \delta = m \omega^2 \lambda \sin \varphi \cos \delta \quad (8)$$

$$F_x = N f = (G_z - W - S_z) f \quad (9)$$

$$T_x = T \cdot \cos \delta = -k \cdot S \cdot \cos \delta \quad (10)$$

gdzie:

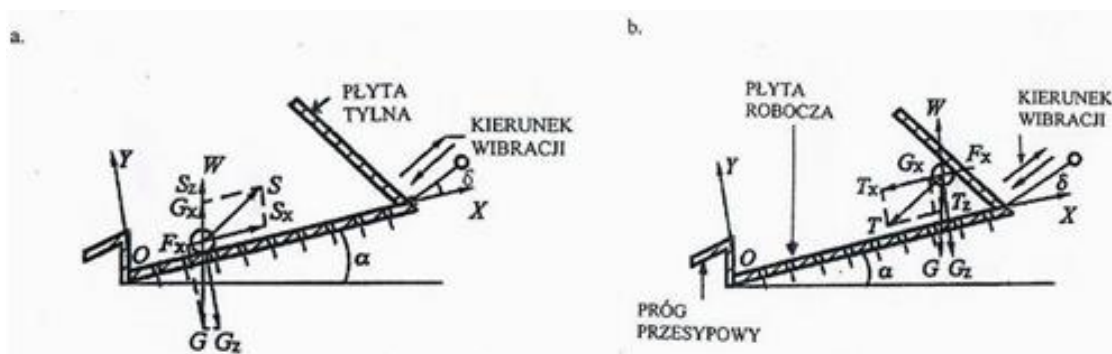
- $G_z$  – składowa siły ciężkości działająca wzdłuż osi  $Y$ ,
- $S_z$  – składowa siły bezwładności działająca wzdłuż osi  $Y$ ,
- $W$  – siła wyporu wznoszącego się strumienia powietrza,
- $\delta$  – kąt pomiędzy kierunkiem wibracji a osią  $X$ ,
- $\alpha$  – kąt nachylenia płyty roboczej stołu, o wartości:  $0^\circ < \alpha < 15^\circ$ .

Siły  $G_z$ ,  $S_z$  i  $W$  wyrażone są wzorami:

$$G_z = G \cdot \cos \alpha = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

$$S_z = S \cdot \cos \varphi = m \omega^2 \lambda \cos \varphi \quad (12)$$

$$W = \psi d^2 \rho \quad (13)$$



Rys. 3. Rozkład sił działających podczas procesu separacji (przekrój poprzeczny przestrzeni roboczej)

- a) ziarno znajdujące się na powierzchni płyty roboczej
- b) ziarno znajdujące się nad powierzchnią płyty roboczej dotykające tylną część płyty separatora

Tak więc wzór (9) określający składową siły tarcia w kierunku osi X przyjmuje postać:

$$F_x = \left[ \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \cos \alpha - \psi d^2 v^2 \rho - m \omega^2 \lambda \sin \varphi \sin \delta \right] \cdot f \quad (14)$$

Zaprezentowane w punkcie 2. siły działające na ziarno znajdujące się w przestrzeni roboczej (na powierzchni płyty roboczej lub w zawieszeniu) zostały wykorzystane przy budowie mechanizmu opisującego ruch ziaren mineralnych przemieszczających się wzdłuż osi X i Y.

### 3. Równanie ruchu ziarna na powierzchni płyty roboczej

Rozpatrywany jest ruch ziarna mineralnego przemieszczającego się wzdłuż osi X na powierzchni płyty roboczej stołu koncentracyjnego. Ruch ten można wyrazić wzorem:

$$m \frac{dv_x}{dt} = S_x - G_x - F_x \quad (15)$$

Podstawiając w miejsce  $S_x$ ,  $G_x$ ,  $F_x$  podane w punkcie 2. wzory (7, 8 i 14) otrzymuje się:

$$m \frac{dv_x}{dt} = m \omega^2 \lambda \sin \varphi \cos \delta - \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \cdot \sin \alpha + \left[ \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \cos \alpha - \psi d^2 v^2 \rho + m \omega^2 \lambda \sin \varphi \sin \delta \right] \cdot f \quad (16)$$

a zatem:

$$\frac{dv_x}{dt} = \omega^2 \lambda \sin \varphi (\cos \delta + f \sin \delta) - g (\sin \alpha + f \cos \alpha) \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} + \frac{6\psi}{\pi d} \frac{\rho}{\rho_s} v^2 f \quad (17)$$

przyjmując, że:

$$\psi' = \frac{6}{\pi} \psi \quad (18)$$

otrzymujemy równanie ruchu ziarna w postaci:

$$\frac{dv_x}{dt} = \omega^2 \lambda \sin \varphi (\cos \delta + f \sin \delta) + \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) (\sin \alpha + f \cos \alpha) g + \psi' f v^2 \frac{\rho}{\rho_s} \frac{1}{d} \quad (19)$$

Analizując równanie (19) można stwierdzić, że główny wpływ decydujący o ruchu ziarna wzdłuż osi X ma pierwszy człon równania. Drugi człon równania jest składową siły ciężkości w kierunku osi X wynikającą z nachylenia płyty roboczej stołu koncentracyjnego. Trzecia część równania jest składową naporu wraz z siłami tarcia ziarna poruszającego się wzdłuż osi X pomniejszonych o oddziaływanie wyporu płynącego strumienia powietrza.

Ponieważ gęstość powietrza ( $\rho = 0,00123 \text{ g/cm}^3$ ) jest mniejsza od gęstości ziarna ( $\rho_s \approx 1,50 \text{ g/cm}^3$ ) można przyjąć uproszczenie, że stosunek tych gęstości jest bliski zero. Przyjmując to uproszczenie równanie ruchu ziaren przedstawia się następująco:

$$\frac{dv_x}{dt} = \omega^2 \lambda \sin \varphi (\cos \delta + f \sin \delta) + g (\sin \alpha + f \cos \alpha) \quad (20)$$

Równanie (20) pokazuje, że ruch ziarna mineralnego w kierunku osi X (po powierzchni płyty roboczej) jest zależny od parametrów związanych z siłami pochodzącymi od wibracji płyty roboczej. A więc od kątovej częstotliwości wibracji ( $\omega$ ), amplitudy wibracji ( $\lambda$ ), kąta fazowego wibracji ( $\varphi$ ), kąta pomiędzy kierunkiem wibracji a osią X ( $\delta$ ) i współczynnika tarcia ( $f$ ). Drugi człon powyższego wzoru pokazuje, że zwiększanie wyporu płynącej strugi powietrza ma mały wpływ na ruch ziarna wzdłuż osi X, a zatem może być niezauważalny.

### 4. Równanie ruchu ziarna nad powierzchnią płyty roboczej

Rozkład sił oddziaływujących na ziarno mineralne znajdujące się w warstwie fluidalnej nad powierzchnią płyty roboczej stołu koncentracyjnego można przedstawić poniższym wzorem:

$$\frac{dv_x}{dt} = T_x + G_x + F_x \quad (21)$$

podstawiając w miejsce  $T_x$ ,  $G_x$ ,  $F_x$  podane w punkcie 2. (wzory 7, 9 i 10) otrzymuje się:

$$\frac{dv_x}{dt} = k \cdot S \cdot \cos \delta + G \cdot \sin \alpha + (G_z - W - S_z) \cdot f \quad (22)$$

oraz podstawiając za  $G_z$ ,  $W$ ,  $S_z$  podane uprzednio wartości można zapisać powyższą zależność w postaci:

$$\frac{dv_x}{dt} = k \cdot m \omega^2 \lambda \sin \varphi \cos \delta - \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \cdot \sin \alpha + \left[ \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \cos \alpha - \psi d^2 v^2 \rho + m \omega^2 \lambda \sin \varphi \sin \delta \right] \cdot f \quad (23)$$

a po przekształceniach:

$$\frac{dv_x}{dt} = \omega^2 \lambda \sin \varphi (k \cos \delta + f \sin \delta) + g (\sin \alpha - f \cos \alpha) \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} + \frac{6\psi}{\pi d} \frac{\rho}{\rho_s} v^2 f \quad (24)$$

Analizując równanie (24), można stwierdzić, że ziarno znajdujące się nad powierzchnią płyty roboczej będą poruszać się pod wpływem naporu tylnej płyty wynikającego z usytuowania i konstrukcji tylnej części płyty konstrukcji separatora, siły ciężkości oraz dodatkowego wpływu wyporu płynącej strugi powietrza. Kluczowy, jak się okazuje, jest napór, działający na ziarno, od tylnej części płyty. Ważną, w kolejności, jest także siła ciężkości.

Przyjmując, jak uprzednio, że stosunek różnic gęstości powietrza i gęstości ziarna jest bliski zero, można równanie ruchu ziaren przedstawić w uproszczonej formie:

$$\frac{dv_x}{dt} = \omega^2 \lambda \sin \varphi (k \cos \delta + f \sin \delta) + g (\sin \alpha + f \cos \alpha) \quad (25)$$

Równanie (25) przedstawia główne i wtórne czynniki powodujące ruch ziarna nad powierzchnią płyty roboczej stołu koncentracyjnego. Pierwszy człon tego równania posiada większą wartość niż człon drugi; ma więc większy wpływ na zachowanie się ziarna.

Porównując uproszczone równania ruchu ziaren na płycie i nad płytą łatwo zauważyć, że ich przyspieszenia są w zasadzie takie same (równe). Oznacza to, że ziarna (zarówno lżejsze, jak i cięższe) będą wykonywać ruch śrubowo-obrotowy. Ruch ten pokazywany jest na rysunkach objaśniających zasadę pracy powietrznego stołu koncentracyjnego (rys. 2).

## Podsumowanie

Powietrzny stół koncentracyjny charakteryzuje się złożoną technologią suchego rozdziału ziaren różniących się gęstością. Proces separacji odbywa się w medium (zawieszynie) dwufazowej. Zawieszina ta nazywana jest również złożem fluidalnym. Składa się z medium powietrze – ciało stałe. Tworzy się samoczynnie przez zawarte w nadawie urobku węglowego drobne cząsteczki zawieszane we wznoszącym się strumieniu powietrza. Dzięki utworzeniu się warstwy fluidalnej ziarna przemieszczają się w niej w ten sposób, że ziarna ciężkie trafiają na powierzchnię płyty roboczej i przemieszczają się wzdłuż płyty roboczej. Ziarna lżejsze trafiają do górnej warstwy złoża fluidalnego i dzięki ruchowi śrubowo-obrotowemu są odprowadzane (do zbiorników produktów) kolejno wg rosnącej ich gęstości.

Przedstawiony w artykule model matematyczny, opracowany przez profesora He Jianinga, jest pierwszą próbą opisu ruchu ziaren podczas separacji na powietrznym stole koncentracyjnym. Tu trzeba dodać, że rzeczywisty rozdział ziaren odbywa się w warunkach skrępowanych gdzie oddziałują także ziarna pomiędzy sobą. Analiza separacji ziaren w warunkach skrępowanych nie została dotychczas zaprezentowana w dostępnych publikacjach. Należy mieć nadzieję, że prace takie będą prowadzone. Pozwoliłoby to uzyskać dokładniejsze informacje o zachowywaniu się ziaren w takich warunkach oraz zrozumieć bardzo złożony proces rozdziału ziaren w instalacjach powietrznych stołów koncentracyjnych.

## Literatura

1. Baic I., Blaschke W., Góralczyk S., Sobko W., Szafarczyk J. 2013. Odkamienianie urobku węglowego metodą suchej separacji. Monografia: Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Wyd. KOMAG. Gliwice, s. 99 – 108.
2. Baic I., Blaschke W., Sobko W., Szafarczyk J., Okarmus P. 2014. Badania możliwości usuwania kamienia z urobku węgla koksowego na powietrznych stołach koncentracyjnych. Monografia: Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych „KOMEKO 2014”. Wyd. ITG KOMAG, Gliwice, s. 65 – 79.

3. Baic I., Blaschke W., Sobko W., Szafarczyk J. 2014. Badania nad wzbogacaniem węgla kamiennych na powietrznych stołach koncentracyjnych. Wiadomości Górnicze nr 7–8, s. 417 – 421.
4. Baic I., Blaschke W., Sobko W., Szafarczyk J., Buchalik G. 2014. Nowoczesne powietrzne stoły koncentracyjne do wzbogacania węgla kamiennego. Mat. Konf. „Nowoczesne rozwiązania z zakresu procesów technologicznych przeróbki węgla”. Wyd. CNP EMAG (płyta CD), Katowice-Szczyrk, s. 60 – 71.
5. Baic I., Blaschke W., Góralczyk S., Sobko W., Szafarczyk J. 2013. Odkamienianie urobku węglowego metodą suchej separacji. Monografia: Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Wyd. KOMAG, Gliwice, s. 99 – 108.
6. Baic I., Blaschke W., Góralczyk S., Szafarczyk J., Buchalik G. 2015. Nowa ekologiczna metoda usuwania zanieczyszczeń skałą płonną z urobku węgla kamiennego. Rocznik Ochrony Środowiska. Annual Set The Environment Protection. Tom 17, s. 1274 – 1285.
7. Baic I., Blaschke W., Sobko W., Fraś, A. 2015. Application of Air Cocentrating Table for Improvement in the Quality Parameters of the Commercial Product „Jaret”. Inżynieria Mineralna z. 1/35, Rocznik XVI, s. 221 – 226.
8. Blaschke W., Baic I., Sobko, W. 2015. Badania nad odkamienianiem energetycznego węgla kamiennego na powietrznych stołach koncentracyjnych. Rocznik Ochrony Środowiska. Annual Set The Environment Protection. Tom 17, s. 958 – 972.
9. Blaschke, W. 2013. Nowa generacja powietrznych stołów koncentracyjnych. Zeszyty Naukowe Instytutu GSMiE PAN nr 84, s. 67 – 74.
10. Blaschke, W. 2014. Zasady wzbogacania na powietrznym stole koncentracyjnym. Czasopismo Techniczne KTT nr 154 – 161, 2013 – 2014, Kraków, s. 10 – 14.
11. Ghost T., Patil D., Parekh B.K., Honaker, R.Q. 2013. Upgrading low Rank Coal Using a Dry, Density-Based Separator Technology. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Coal Preparation Congress, Istanbul, s. 295 – 308.
12. He, Jianing 2006. Market Prospect of Application of the Compound Dry Coal Cleaning Technology. China Coal nr 1. Technology Monograph of the Tangshan Shenzhou Machinery Co., Ltd. s. 29 – 31.
13. Prace studialne dotyczące możliwości implementacji w warunkach polskich technologii suchego odkamieniania urobku węgla kamiennego. Praca statutowa IMBiGS nr 14-70/411-01-12. Katowice 2012.