

Władysław PILCH  
Wacław POLANSKI  
H. KOMOROWSKA

Instytut Przeróbki i Wykorzystania  
Surowców Mineralnych  
Akademia Górniczo-Hutnicza

## NIEKTÓRE WYNIKI WZBOGACANIA METODĄ TRYBOELEKTRYCZNĄ WYBRANYCH SUROWCÓW MINERALNYCH

### 1. Wstęp

Efektywność separacji elektrycznej jest funkcją natężenia pola oraz wielkości ładunku nabytego przez ziarna. Ładowanie się cząstek minerałów może zachodzić na kilka sposobów, przy czym jeżeli realizowane jest drogą kontaktu i tarcia z powierzchnią elektryzatora to mamy wówczas do czynienia z tryboelektryzacją. Ten sposób elektryzowania stwarza możliwości stosowania separacji elektrostatycznej dla szerokiego zakresu surowców. Wynika to między innymi stąd, że zarówno wielkość jak i znak ładunku na ziarnach zależy istotnie od struktury energetycznej ich warstw powierzchniowych i powierzchni z jaką się kontaktują. Parametry te można zmieniać czy modyfikować na wiele sposobów.

Na przestrzeni ostatnich kilku lat ukazało się szereg prac poświęconych separacji tryboelektrycznej. Opierając się na publikowanych wynikach doświadczeń można stwierdzić, że jest to skuteczny sposób rozdzielania minerałów, w szczególności dielektryków, o ziarnistościach nawet poniżej 5  $\mu\text{m}$ . Jeżeli wziąć jeszcze pod uwagę fakt, że proces separacji prowadzony jest na sucho to niewątpliwie metoda ta jest interesująca.

### 2. Podstawy teoretyczne [1 - 10]

Zjawiska zachodzące na granicy faz przy kontakcie dwóch ciał stałych, jak to ma miejsce podczas tryboelektryzacji, można wyjaśnić opierając się na pasmowym modelu budowy ciała stałego. Zgodnie z tym modelem w obrębie ciał stałych wyróżniają się dwie grupy: jedna to przewod-

niki charakteryzujące się brakiem strefy zabronionej z czego wynika, że pasma energii dozwolonych zachodzą na siebie i elektrony mogą swobodnie poruszać się wewnątrz kryształu, grupa druga to ciała, w których pomiędzy pasmem podstawowym i pasmem przewodnictwa istnieje pasmo energii wzbronionych. Jeżeli szerokość strefy zabronionej jest rzędu 2 eV to ciała te są półprzewodnikami. Im większy jest ten przedział energii tym lepszym izolatorem jest dane ciało.

Wielkością odgrywającą bardzo ważną rolę w pasmowej teorii ciała stałego jest energia Fermiego. Wynika to z faktu, że położenie poziomu Fermiego w stosunku do dna pasma przewodnictwa oraz pułapu pasma podstawowego określa stężenie quasi-swobodnych elektronów i dziur w kryształach:

$$n_e = A_1 \exp \left[ - (E_L - E_F) / kT \right]$$

$$n_d = A_2 \exp \left[ - (E_F - E_N) / kT \right]$$

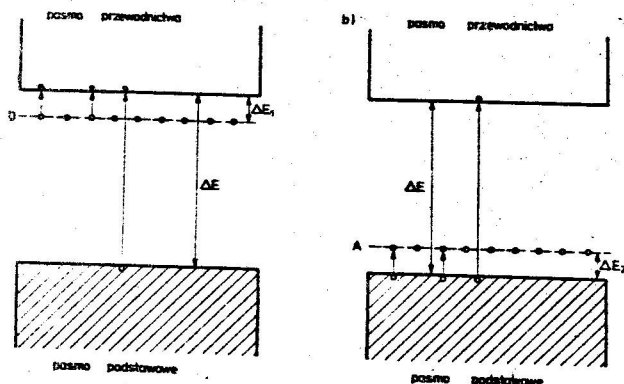
gdzie:  $n_e, n_d$  - koncentracje nośników,

$E_F$  - poziom Fermiego,

$E_N, E_L$  - poziom podstawowy i poziom przewodnictwa.

W przypadku idealnych kryształów półprzewodnikowych i izolatorów, poziom Fermiego leży w połowie strefy zabronionej. W rzeczywistości kryształy wykazują mniejsze lub większe odstępstwa od stanu idealnego.

Nie wchodząc w szczegóły opisu zdefektowań można powiedzieć ogólnie, że lokalne zaburzenia prowadzą do powstawania lokalnych poziomów energetycznych położonych w pobliżu defektów. Poziomy te mogą być usytuowane w obrębie strefy zabronionej (rys. 1) [3]. Przeniesienie elektronu z poziomu donorowego do pasma przewodnictwa czy z pasma podstawowego

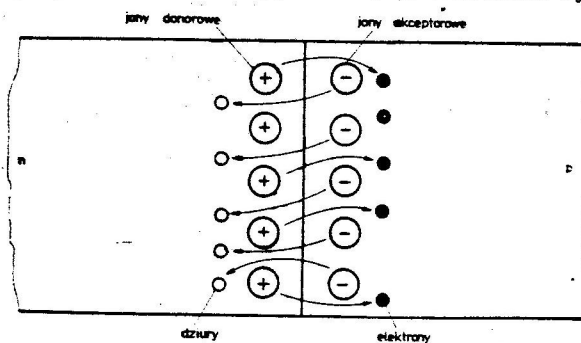


Rys. 1. Widmo energetyczne z poziomami:  
a - donorowymi  
b - akceptorowymi

wego na poziom akceptorowy wymaga naturalnie znacznie mniejszego nakładu energii niż przeskok przez szerokość pasma zabronionego. Pojawienie się poziomów lokalnych w widmie energetycznym półprzewodnika wywołuje przemieszczanie się poziomu Fermiego w górę (dla poziomów donorowych) lub w dół (dla poziomów akceptorowych) w porównaniu z położeniem w idealnym kryształ. Konsekwencją tego jest zwiększenie się względnej liczby nośników ładunku.

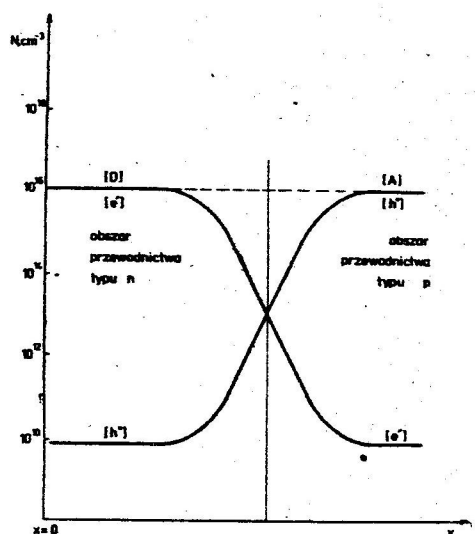
Na powierzchniach kryształów występują różne, w porównaniu do jego wnętrza, stężenia defektów: mogą przy tym występować warstwy uboższe lub wzbogacone w defekty. W wielu przypadkach zmienia się skład chemiczny warstw powierzchniowych w porównaniu z wnętrzem ciała stałego, powstają wtedy tak zwane związki powierzchniowe. Jako defekt sieci możemy również traktować granicę faz, atomy na powierzchni podlegają jednostronnemu działaniu sił od atomów sąsiadujących. Ponieważ jednak każdy element musi pozostawać w równowadze, siły potrzebne do skompensowania występują w warstwie powierzchniowej. W wyniku ich działania mogą ulegać zmianie odstępów międzyatomowe. Może nastąpić rozluźnienie lub zmniejszenie tych odległości. Wszystkie wymienione czynniki powodują, że w warstwach powierzchniowych ulega zmianie widmo energetyczne quasi-swobodnych nośników. W związku z tym zmieniają się również wszystkie wielkości zależne od stężenia i ruchliwości elektronów i dziur. W warstwach powierzchniowych istnieją więc dodatkowe poziomy zlokalizowane w strefie energii wzbronionych. Quasi-swobodne elektrony zapełniające te poziomy mają zbyt małą energię aby mogły się poruszać w obrębie całego kryształu, niemniej jednak mogą swobodnie wędrować po powierzchni. Zlokalizowanie na powierzchni dodatkowych poziomów umożliwia więc intensywny przebieg procesów wymiany elektronów na powierzchniach.

Zetknięcie dwu kryształów prowadzi między innymi do utworzenia warstwy zaporowej, w której istnieje gradient potencjału elektrycznego. Zmienia się w ten sposób stan energetyczny w warstwach powierzchniowych. Schemat kontaktu między półprzewodnikami typu n i p przedstawia rys.2[1]

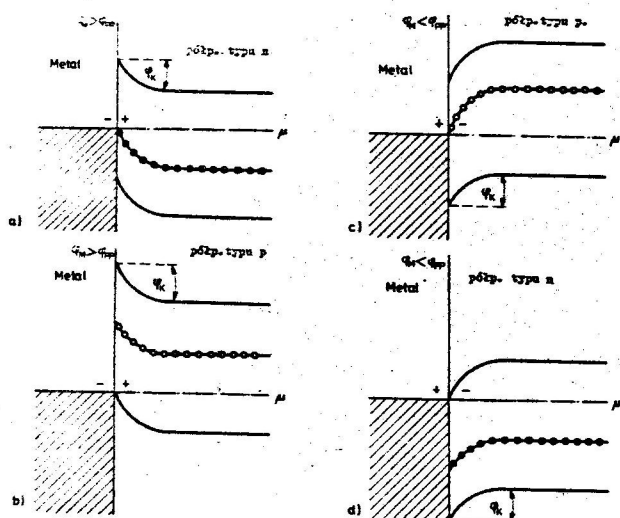


Rys. 2. Schemat kontaktu między półprzewodnikami typu n i p

Na rys. 3 schematycznie ukazano zmianę koncentracji nośników na złączu. Rysunek 4 przedstawia sytuację na złączach pomiędzy metalem i półprzewodnikiem.



Rys. 3. Stężenie quasi - swobodnych elektronów  $[e^-]$  i dziur  $h'$  na styku półprzewodników typu p i n (D i A oznaczają odpowiednio stężenie donatorów i akceptorów)



Rys. 4. Kontakt metal - półprzewodnik

Parametrem, który mówi nam o możliwości opuszczania przez elektron powierzchni metalu jest praca wyjścia. Jest ona różna dla elektronów o różnych energiach, ponieważ jednak największe prawdopodobieństwo wyjścia z metalu cechuje elektrony o energii Fermiego, stąd za pracę wyj-

cia uważa się energię jaką należy dostarczyć elektronowi na poziomie Fermiego aby go przenieść z metalu do próżni. W sytuacji gdy zetknięty dwa metale o różnych pracach wyjścia i położeniach poziomów Fermiego, nastąpi dyfuzyjne przechodzenie elektronów pomiędzy nimi. Na złączu wytworzy się kontaktowa różnica potencjałów proporcjonalna do różnicy prac wyjścia. Gdy w takiej sytuacji przerwiemy kontakt na powierzchniach stykających się uprzednio pozostaną ładunki elektryczne. W następnym rozdziale przedstawiono w oparciu o dane literaturowe, możliwości elektryzowania ciał w zależności od wartości prac wyjścia kontaktujących się materiałów.

### 3. Przegląd prac z zakresu separacji tryboelektrycznej

#### 3.1. Pomiary ładunków elektrycznych

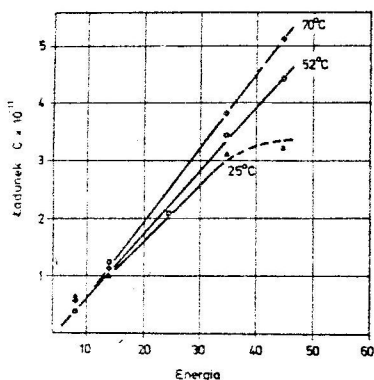
O efekcie separacji tryboelektrycznej decydują znaki i wartości ładunków uzyskanych przez ziarna. Elektryzacja winna być prowadzona selektywnie, aby rozdzielane minerały otrzymywały ładunki przeciwnych znaków. Warunek ten będzie spełniony jeśli praca wyjścia elektryzatora będzie miała wartość pośrednią w stosunku do prac wyjścia minerałów rozdzielanych. Znając prace wyjścia minerałów można wstępnie dobrać elektryzatory a następnie spośród nich wybrać ten, który zapewnia największe zróżnicowanie ładunków. Doboru dokonujemy doświadczalnie, mierząc ładunki powstałe na skutek kontaktu elektryzator-minerał. W tabeli 1 [13] podane są przykładowo znaki i wartości ładunków otrzymanych na ziarnach różnych minerałów w wyniku ich kontaktu z miedzią, niklem, perspeksem.

T a b e l a 1

Wartości i znaki ładunków elektrycznych

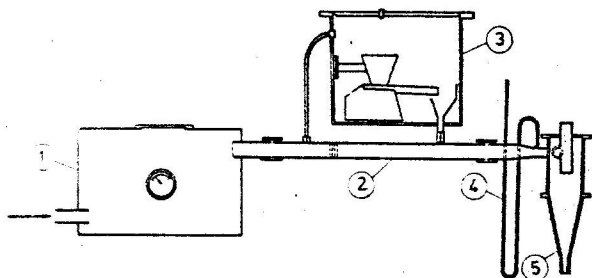
| Minerał | Praca wyjścia<br>$\phi$ /eV/ | Miedź<br>( $\phi=4,74$ eV) | Nikiel<br>( $\phi=4,80$ eV) | Perspek<br>( $\phi=2,70$ eV) |
|---------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
|         |                              | Ładunek /C/                | Ładunek /C/                 | Ładunek /C/                  |
| Piryt   | 5,35                         | $-2,5 \times 10^{-13}$     | $-3,9 \times 10^{-13}$      | $-8,0 \times 10^{-11}$       |
| Hematyt | 5,25                         | $-5,2 \times 10^{-13}$     | $-7,0 \times 10^{-13}$      | $-3,2 \times 10^{-11}$       |
| Galena  | 4,95                         | $-4,7 \times 10^{-13}$     | $-3,6 \times 10^{-13}$      | $-7,8 \times 10^{-12}$       |
| Kwarc   | 4,65                         |                            | $+6,8 \times 10^{-12}$      | $-1,2 \times 10^{-11}$       |
| Dolomit | 4,44                         | $+1,6 \times 10^{-11}$     | $+1,8 \times 10^{-11}$      | $-1,6 \times 10^{-11}$       |
| Fluoryt | 3,50                         | $+1,4 \times 10^{-11}$     | $+2,2 \times 10^{-11}$      | $-7,4 \times 10^{-11}$       |
| Kalcyt  | 3,20                         | $+7,8 \times 10^{-12}$     | $+3,1 \times 10^{-12}$      | $+1,4 \times 10^{-13}$       |

Materiały sypkie można elektryzować na wibrujących płytach, jednak ta metoda zapewnia stosunkowo mały ładunek. Można go zwiększać przez zwiększenie energii wydatkowanej na kontakt ziarna z elektryzatorem [16]. Na rysunku 5 przedstawiono zależność wielkości ładunku od tej energii.



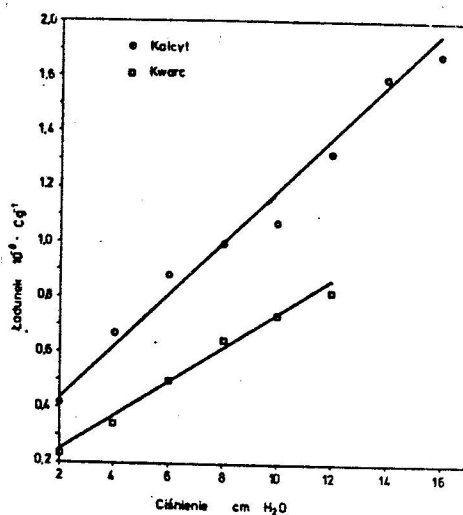
Rys. 5. Zależność ładunku od energii wydatkowanej na kontakt ziarna z elektryzatorem

Znacznie skuteczniejszą metodą jest metoda dynamiczna, polegająca na zwiększeniu energii ziarna poprzez ich transport pneumatyczny. Na rysunku 6 przedstawiono urządzenie do elektryzacji ziarna w cyklonie [16].



Rys. 6. Urządzenie do tryboelektryzacji

Przepływ powietrza zapewnia dmuchawa połączona z przepustnicą i przepływomierzem. Powietrze mieszane jest w skrzyni 1 w której mierzona jest temperatura i wilgotność. Następnie strumień gazu przechodzi przez poziomą rurę zawierającą przegrodę, która zapewnia powstanie gradientu ciśnienia między wibrującym zespołem podajnika 3 a punktem wylotu nadawcy. Cząstki mineralne w zawieszynie powietrznej są wprowadzane do cyklonu elektryzującego. Zwiększając ciśnienie powietrza można zwiększać ładunek uzyskiwany przez ziarna [16]. Zależność wielkości ładunku od ciśnienia powietrza przedstawia rysunek 7. Ta metoda elektryzacji może być stosowana do materiałów pylistych.



Rys. 7. Zależność wielkości ładunku od ciśnienia powietrza transportującego

W tabeli 2 zestawiono wartości ładunków uzyskiwanych na ziarnach stosując elektryzację na płycie wibrującej i w strumieniu powietrza [7].

T a b e l a 2

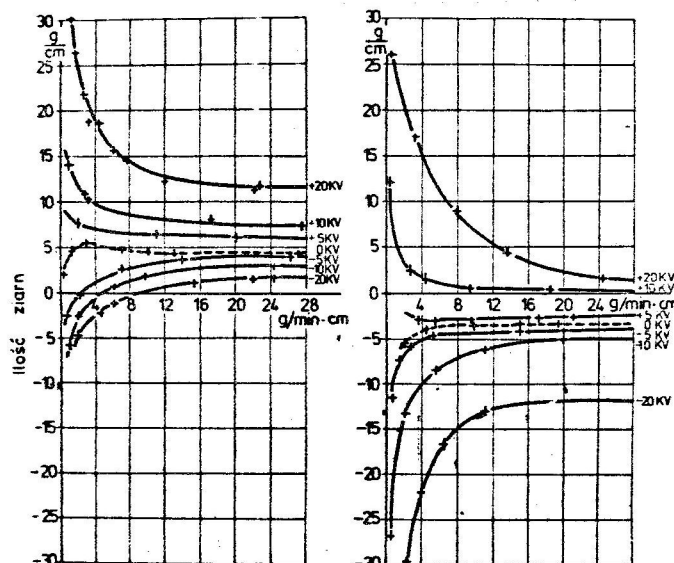
Porównanie wartości ładunków tryboelektrycznych  
uzyskanych różnymi metodami

| Materiał      | A<br>ładunek uzyskany na<br>płycie wibrującej | B<br>ładunek uzyskany w<br>strumieniu gazu | $\frac{B}{A}$ |
|---------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|
| Kwarc         | 1,2                                           | 240                                        | 200           |
| Kalcyt        | 2,2                                           | 93                                         | 42            |
| Mikroclin     | 0,6                                           | 16                                         | 27            |
| Tlenek miedzi | 1,1                                           | 80                                         | 70            |
| Tlenek cynku  | 1,0                                           | 80                                         | 80            |
| Tlenek glinu  | 0,5                                           | 140                                        | 280           |

### 3.2. Wpływ napięcia przyłożonego do elektryzatora na wartość i znak ładunku [13,17]

Wielkością oraz znakiem ładunku tryboelektrycznego można w znacznym zakresie sterować przykładając napięcie do elektryzatora. M. Carta [13,17] wykonywał doświadczenia polegające na elektryzowaniu barytu i

kwarcu o uziarnieniu 0,7-1,0 mm na płycie płaskowcowej o grubości 10mm, umieszczonej na metalowej podkładce, do której przykładano napięcie. Wartości ładunków w funkcji wydajności przy różnych wartościach napięcia na elektryzatorze przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Ładunek tryboelektryczny w funkcji wydajności dla różnych wartości napięcia na elektryzatorze; a - baryt, b - kwarc

### 3.3. Wpływ wilgotności powietrza na proces elektryzacji [21]

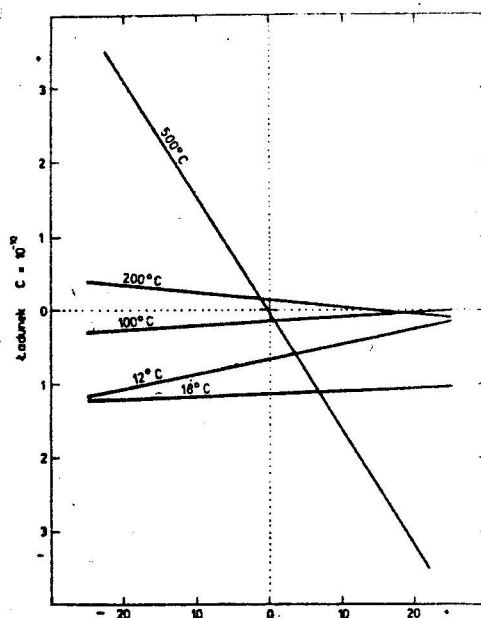
Zależność tą badano mierząc ładunki powstałe na kulkach pyrekso- wych toczonych po płycie ze stali nierdzewnej przy różnych wartościach napięcia przykładanego do płyty i różnych wilgotnościach powietrza. Obrazuje to wykres na rys. 9.

### 3.4. Wpływ temperatury materiału elektryzowanego na wielkość ładunku [18,21]

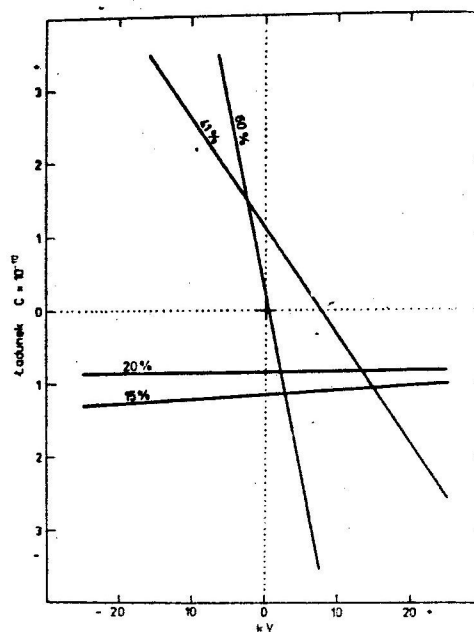
Zależność tą wyznaczono w analogiczny sposób jak opisano powy- żej, z tym że zachowując stałą wilgotność powietrza i temperaturę elek- tryzatora zmieniano temperaturę kulek pyrekso- wych. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 10.

Oprócz omówionych wyżej czynników wpływających na wartość i znak ładunku, duże znaczenie ma obróbka ziarn przed ich elektryzacją odczyn- nikami chemicznymi. Zagadnienie to jest szeroko omówione w wielu pra- cach [7,15,16].

Rys. 9. Zależność ładunku od napięcia na elektryzatorze przy różnych temperaturach

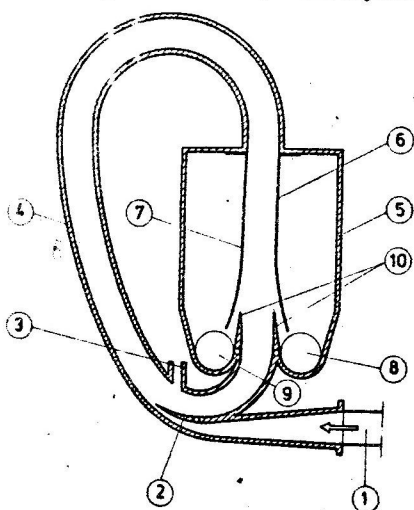


Rys. 10. Zależność ładunku od napięcia na elektryzatorze przy różnych wilgotnościach powietrza

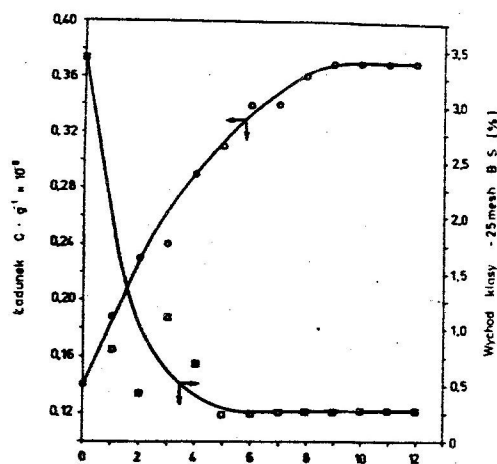


### 3.5. Separatory tryboelektryczne

W pracach [13,17] M. Carta przedstawił separator tryboelektryczny "elektrocyclozet". Separator ten przedstawiono na rys. 11. Działanie separatora jest następujące. Nadawa wprowadzana jest przez otwór 3 za pośrednictwem strumienia gazu poprzez dyszę 1. Ziarna przemieszczają się wzdłuż kanału 4, elektryzują się w nim i naładowane wpadają w przestrzeń działania pola elektrycznego wytworzonego między elektrodami 6 i 7. W zależności od znaku posiadanego ładunku ziarna odchylane są w stronę jednej lub drugiej elektrody i odprowadzane przez odbieralniki 8 lub 9. Pozostałe ziarna są ponownie elektryzowane, co zapewnia uzyskanie większego ładunku. Rysunek 12 [13] przedstawia zależność wielkości ładunku od ilości elektryzacji. Druga krzywa przedstawia wychód pyłu (odprowadzanego po każdej elektryzacji) powstałego przy ścieraniu się ziarn o powierzchnię elektryzatora.



Rys. 11. Separator "elektrocyclozet"



Rys. 12. Zależność ładunku od ilości elektryzacji

### 3.6. Wyniki separacji tryboelektrycznej

W tabelach 3a i 3b [13] przedstawiono wyniki wzbogacania za pośrednictwem przedstawionego na rys. 11 separatora. Przedmiotem separacji była nadawa surowca barytowego o zawartości 57,41%  $BaSO_4$  i 41,30%  $SiO_2$ . Nadawę stanowiła klasa ziarnowa 0 - 0,5 mm.

T a b e l' a 3a

Wyniki wzbogacania w separatorze "elektrocyklozet"

| Produkt    | Wychód % | Zawartość %       |                  | Uzysk %           |                  |
|------------|----------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
|            |          | BaSO <sub>4</sub> | SiO <sub>2</sub> | BaSO <sub>4</sub> | SiO <sub>2</sub> |
| Koncentrat | 56,56    | 98,36             | 1,05             | 96,89             | 1,43             |
| Odpady     | 43,44    | 4,10              | 93,72            | 3,11              | 96,57            |
| Nadawa     | 100,00   | 57,41             | 41,30            | 100,00            | 100,00           |

T a b e l' a 3b

Wyniki wzbogacania w poszczególnych klasach ziarnowych

| Klasa<br>ziarn.<br>µm | Wychód % |       |        | Zaw. BaSO <sub>4</sub> % |       |       | Uzysk BaSO <sub>4</sub> % |       |        |
|-----------------------|----------|-------|--------|--------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|--------|
|                       | Konc.    | Odp.  | Nad.   | Konc.                    | Odp.  | Nad.  | Konc.                     | Odp.  | Nad.   |
| 500-297               | 13,36    | 14,74 | 28,10  | 98,50                    | 2,90  | 48,35 | 96,85                     | 3,15  | 100,00 |
| 297-147               | 13,93    | 13,20 | 27,13  | 98,50                    | 2,35  | 52,23 | 97,81                     | 2,19  | 100,00 |
| 147- 74               | 11,82    | 9,76  | 21,58  | 98,50                    | 1,65  | 54,70 | 98,64                     | 1,36  | 100,00 |
| 74-44                 | 6,46     | 3,06  | 9,52   | 99,50                    | 5,15  | 69,17 | 97,61                     | 2,39  | 100,00 |
| 44-31                 | 3,63     | 0,69  | 4,32   | 97,89                    | 18,90 | 85,27 | 96,46                     | 3,54  | 100,00 |
| 31-20                 | 5,51     | 1,47  | 6,98   | 96,57                    | 26,00 | 81,71 | 93,29                     | 6,71  | 100,00 |
| -20                   | 1,85     | 0,52  | 2,37   | 90,01                    | 46,74 | 80,52 | 87,26                     | 12,74 | 100,00 |
| Nadawa                | 56,56    | 43,44 | 100,00 | 98,36                    | 4,17  | 57,44 | -                         | -     | -      |

W tabeli 3b przedstawiono odpowiednio zawartości i uzyski BaSO<sub>4</sub> w poszczególnych klasach ziarnowych, otrzymanych w wyniku analiz sitowych nadawy i produktów wzbogacania. Jak wynika z tabeli 3b, wzbogacanie jest efektywne nawet dla nadrobniejszych ziarn i tak np.: uzysk BaSO<sub>4</sub> w klasie 20-31 µm wynosi 93%, a w klasie - 20 µm 87%.

Prowadzono także badania nad wzbogacaniem w separatorze "elektrocyklozet" rudy fluorytowej [13], w której skałę płąną stanowiły: tlenki żelaza, kwarc, łupki i gliny. Wzbogacaniu poddano nadawę o ziarnistości 0-0,5 mm separując wtórnie koncentrat i odpady przy ciągłej recyrkulacji produktu pośredniego. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 4.

T a b e l a 4

## Wyniki wzbogacania rudy fluorytowej

| Produkt      | Wychód % | Zawartość $\text{CaF}_2$ % | Uzysk $\text{CaF}_2$ % |
|--------------|----------|----------------------------|------------------------|
| Koncentrat 1 | 45,74    | 97,63                      | 88,75                  |
| Koncentrat 2 | 0,75     | 71,86                      | 1,07                   |
| Odpady 1     | 50,82    | 9,11                       | 9,20                   |
| Odpady 2     | 2,69     | 18,35                      | 0,98                   |
| Nadawa       | 100,00   | 50,32                      | 100,00                 |

Koncentrat 2 i odpady 2 są produktami ułwowionymi po separacji w elektrofiltrach i średnia wielkość ziarn w tych produktach wynosi około 5  $\mu\text{m}$ . Porównując zawartości  $\text{CaF}_2$  w tych produktach okazuje się, że nawet przy tak drobnych ziarnach następuje efektywne wzbogacanie.

Prowadzone były także badania [13] nad rozdziałem galeny i dolomitu, w wyniku których wydzielone zostały koncentraty o zawartości 82,40% Pb, odpady o zawartości 0,13 % Pb z nadawy zawierającej 14,78% Pb.

Przytoczone przykłady dowodzą, że separacja tryboelektryczna może być skutecznym sposobem wzbogacania nawet materiałów o konsystencji pylastej na sucho, co stanowi jej bezsporny walor.

#### 4. Wyniki prac własnych

##### 4.1. Wprowadzenie

Zaprezentowane w literaturze wyniki surowców mineralnych metodą tryboelektryczną, animują do podjęcia na szeroką skalę zakrojonych badań nad jej stosowaniem do surowców krajowych. Badania takie prowadzone są w Instytucie Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Wstępne wyniki tych badań przedstawiono w następnych rozdziałach.

##### 4.2. Opis stanowiska badawczego

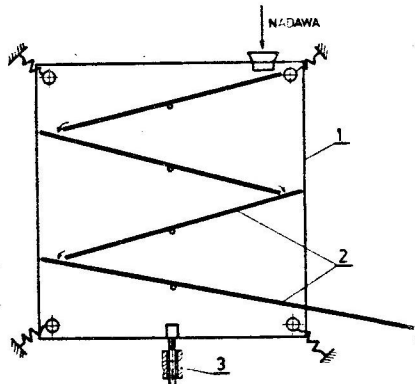
###### 4.2.1. Stabilizacja temperatury i wilgotności

W celu uzyskania powtarzalności wyników pomiaru ładunku oraz se-

paracji, należy zapewnić między innymi stałą wilgotność i temperaturę otoczenia. Osiągnięte to zostało dzięki zainstalowaniu klimatyzatora. Pozwala on na utrzymanie stałej temperatury w zakresie od 5 - 40°C i stałej wilgotności względnej w granicach od 15 - 95%.

#### 4.2.2. Urządzenie do elektryzacji ziarn

Badania nad tryboelektryzacją mają na celu znalezienie optymalnego materiału elektryzatora dla poszczególnych surowców, poprzez pomiar ładunku uzyskiwanego przy kontakcie minerał - elektryzator. Ze względu na to, urządzenie do elektryzacji ziarn powinno się charakteryzować prostym kształtem elektryzatora i łatwością jego wymiany. Na rysunku 13 przedstawiono budowę tego urządzenia. W kasecie wykonanej z metapleksu, zawieszanej na sprężynach przymocowane są wymienne rynienki elektryzatora. Istnieje możliwość regulacji kąta nachylenia rynien oraz czasu elektryzacji poprzez stosowanie różnej ilości elementów. Nadawa do elektryzacji wprowadzana jest ze zbiornika przez wałek dozujący o regulowanej prędkości obrotowej do najwyższej rynienki elektryzatora (zbiornik i wałek dozujący są wymienne i wykonane z tego samego materiału, z którego wykonane są rynienki).



Rys. 13. Urządzenie do elektryzacji ziarna; 1 - kasecie, 2 - rynienki elektryzatora, 3 - napęd

Kaseta wprowadzana jest w ruch drgający w kierunku pionowym przez napęd mimośrodowy z więzią sztywną. Regulacja prędkości obrotowej i promienia mimośrodów pozwala na uzyskiwanie wskaźnika podrzutu w granicach od 0,9-3,5. Zmieniając wskaźnik podrzutu możemy zmieniać warunki kontaktu ziarn z elektryzatorem.

#### 4.3.2. Pomiar ładunku

Ziarna mineralne po elektryzacji kierowane są do puszki Faradaya o znanej pojemności  $C_F$ . Puszka połączona jest równolegle z woltomierzem elektrostatycznym o pojemności  $C_V$ . Znając pojemności  $C_F$  i  $C_V$  oraz war-

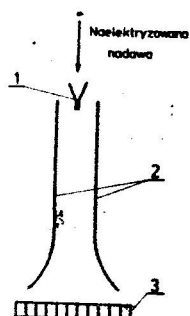
tość napięcia  $U_V$  wskazanego przez woltomierz można obliczyć całkowity ładunek  $Q_C$  zbioru ziarn znajdujących się w puszce.

$$Q_C = U_V / C_F + C_V /$$

#### 4.2.4. Separator elektrostatyczny komorowy

Na rysunku 14 przedstawiony jest separator, w którym prowadzono badania. Pole elektryczne wytwarzane jest między dwoma elektrodami. Ziarna z elektryzatora wpadają w obszar działania pola elektrycznego przy czym lej wysypowy (wykonany z tego samego materiału, z którego wykonany jest elektryzator) zapewnia uzyskanie pionowego toru ziarn przed ich wprowadzeniem między elektrody. Pod elektrodami umieszczony jest zbiornik z wąskimi przegrodami.

Kryterium określającym odchylenie poszczególnych ziarn w polu elektrycznym może być stosunek siły ciężkości działającej na naładowane ziarno do siły pola elektrycznego. Im większa jest wartość tego stosunku tym mniejsze odchylenie ziarna od osi pionowej separatora.



Rys. 14. Separator elektrostatyczny  
1 - lej wysypowy, 2 - elektrody, 3 - komora z przegrodami

### 4.3. Wyniki badań

#### 4.3.1. Przygotowanie materiałów

Przedmiotem badań były następujące materiały o dużej czystości: baryt, fluoryt, kwarc. Minerale te rozdrabniano w ucieraku ceramicznym, a następnie przesiewano. W efekcie otrzymano wąskie klasy ziarnowe, które przemywano wodą destylowaną i suszono.

#### 4.3.2. Opis doświadczeń i ich wyniki

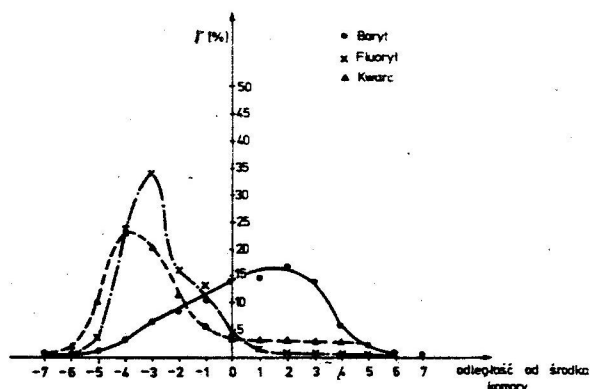
Przygotowane próby barytu, fluorytu i kwarcu o ziarnistości 0,2 - 0,4 mm poddano elektryzacji na stalowych rynienkach. Wartości i znaki otrzymanych ładunków przedstawiono w tabeli 5.

T a b e l a 5

Znak i wartość ładunku tryboelektrycznego  
Temperatura 26°C, wilgotność względna 23%

| Materiał | Znak ładunku | Wielkość ładunku na ziarno<br>/pC/ |
|----------|--------------|------------------------------------|
| Baryt    | +            | 0,109                              |
| Fluoryt  | -            | 0,151                              |
| Kwarc    | -            | 0,029                              |

Następnym etapem było badanie rozkładu ziarn czystych minerałów w polu elektrycznym. Rozkłady te przedstawiono na rys. 15. Ich analiza pozwoliła ustalić przedziały, w których koncentrują się poszczególne minerały a także granice podziału na produkty przy rozdzielaniu tychże minerałów.



Rys. 15. Rozkład czystych minerałów w polu elektrycznym

Do separacji przygotowano mieszaniny: barytu z fluorytem i barytu z kwarcem. W trakcie separacji czyszczono trzykrotnie skrajne produkty z zawrotem produktu przejściowego. Wyniki separacji przedstawiono w tabelach 6, i 7.

Separacja prowadzona była przy natężeniu pola elektrycznego  $E = 700\ 000$  (V/m), w temperaturze 26°C i przy wilgotności względnej 23%.

T a b e l a 6

Wyniki separacji mieszaniny barytu z fluorytem

|            | Zawartość barytu % | Zawartość fluorytu % | Wychód % | Uzysk barytu % | Uzysk fluorytu % |
|------------|--------------------|----------------------|----------|----------------|------------------|
| Nadawa     | 65,44              | 34,56                | 100,00   | 100,00         | 100,00           |
| Produkt I  | 95,65              | 4,35                 | 48,75    | 71,26          | 6,14             |
| Produkt II | 36,70              | 63,60                | 51,25    | 28,74          | 93,87            |

T a b e l a 7

Wyniki separacji mieszaniny barytu z kwarcem

|            | Zawartość barytu % | Zawartość kwarcu % | Wychód % | Uzysk barytu % | Uzysk kwarcu % |
|------------|--------------------|--------------------|----------|----------------|----------------|
| Nadawa     | 69,69              | 30,31              | 100,00   | 100,00         | 100,00         |
| Produkt I  | 87,84              | 12,16              | 61,51    | 77,53          | 24,68          |
| Produkt II | 40,69              | 59,31              | 38,49    | 22,47          | 75,32          |

#### 5. Uwagi i wnioski końcowe

- W pracy przedstawiono teoretyczne podstawy separacji tryboelektrycznej. W oparciu o literaturę dokonano przeglądu prac prowadzonych w tej dziedzinie przez zagraniczne placówki badawcze.

- Przedstawiono opis stanowiska badawczego i wyniki wstępnych doświadczeń prowadzonych w Instytucie Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych AGH w Krakowie.

- W efekcie wzbogacania tryboelektrycznego rozdzielono baryt od fluorytu i baryt od kwarcu uzyskując koncentrat o zawartości powyżej 95% barytu.

- Separacja tryboelektryczna jest nową metodą suchego wzbogacania materiałów drobnoziarnistych i pylastych. Jak wynika z literatury, otrzymano dobre wyniki wzbogacania w zakresie ziarn o wielkości mniejszej od 5  $\mu\text{m}$ .

- Aktualnie dalsze badania w tym zakresie prowadzone są w Instytucie Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych AGH.

## LITERATURA

- 1 KITTEL I.: Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, Warszawa 1974.
- 2 SMITH R.A.: Półprzewodniki.
- 3 DEREN I., PAMPUCH R.: Chemia ciała stałego, PWN, Warszawa 1975.
- 4 PURCELL E.M.: Elektryczność i budowa materii.
- 5 BUSZMANOW B.N., CHROMOW J.A.: Fizyka ciała stałego, Warszawa 1973.
- 6 RALSTON O.C.: Electrostatic separation of mixed granular solids. Elsevier Amsterdam 1961.
- 7 OLOFINSKI N.F.: Elektrostatyckeskiye metody obogaszczeniya, Moskwa 1953.
- 8 PILCH W.: Poradnik górnika t. 5. Wzbogacanie elektryczne, 1976.
- 9 HARPER W.R.: Kontakt and frictional elektrification. Oxford University Press 1967.
- 10 BOUDEN F.P.: Friction and Lubrication of Solids. Oxford University Press 1954.
- 11 REWNICEW W., ULIANOW N.S., ANGIEŁOW A.I.: Teoreticzeskiye osnovy i primienieniya triboelektricheskoy separacii minerałow-dielektrikow. IX. Int. Proc. Cong. Praga 1970.
- 12 CARTA M.: De quelques contributions a la separation électrique des mineraux. Rev. Ind. Miner. 49, 409, 1967.
- 13 CARTA M., FERRARA G., DEL FA G., CICCUCI R.: Progres dans la theorie et l'application de la separation triboelektrique des mineraux. Rev. Ind. Miner. 1969.
- 14 CARTA M., CICCUCI R., DEL FA G., FERRARA M., GHIANI P., MASSACCI P.: The influence of the surface energy structure of minerals on electric separation and flotation. IX Int. Min. Proc. Cong. Praga 1970.
- 15 CARTA M., CICCUCI R., DEL FA G., FERRARA G., GHIANI M., MASSACCI P.: Improvement in electric separation and flotation by modification of energy levels in surface layers. Proc. X Int. Min. Proc. Cong. Londyn 1973.
- 16 POPE M.I., SATTI F., SULTON D.I., PEARSE M.: Factors affecting the triboelectric charging of mineral particles. XI Int. Min. Proc. Cong. Cagliari 1975.
- 17 CARTA M., FERRARA F.: Elektricheskaya separatsiya tonkoizmlenchennykh rud vo wzvieszczenoj sostojani w gazowej sredie z zariadkoj czastice jonizatsieji ili trienijem. VIII Int. Proc. Cong. Leningrad 1968.

- 18 OLOFINSKI N.F., NOWIKOWA V.A., BOLOW V.I.: Application of electrical methods of separation to close sizing of finely dispersed mineral particles.
- 19 INCULET I.I., BERGOWGNOW M.A.: Elektrostatic beneficiation of fine mineral particles in a fluidized bed. X Int. Min. Proc. Cong. London 1973.