

## Teoretyczne i praktyczne aspekty elektryzacji ziaren przez tarcie

**Streszczenie.** Proces elektryzowania ziaren mieszanin proszkowych jest pierwszym etapem ich elektroseparatoracji. W pracy analizowano teoretyczne aspekty procesu nabywania ładunku przez ziarna w trakcie kontaktu z elektryzatorem. Przedstawiono model umożliwiający dobór materiału elektryzatora w zależności od pracy wyjścia zarówno ziaren jak i elektryzatora. Rozpatrzono kilka przypadków granicznych. Przedstawiono również stanowisko badawcze do pomiaru ładunku nabytego przez ziarna w procesie ich elektryzowania w cyklonie. Uzyskane badania eksperymentalne potwierdzają wnioski wynikające z zaproponowanego modelu teoretycznego. Potwierdzają też przydatność cyklonu do elektryzacji ziaren. Pozwala on bowiem na uzyskiwanie znacznych wartości ładunków w porównaniu z innymi urządzeniami (np. wibrującymi płytami).

**Abstract.** Process of the charges generation on particles is the first stage of electroseparation of granular mixtures. In the article, the influence of some essential parameters for generating charges has been analyzed. The article presents model that let select the energiser's material depending on work function of both particles and energiser itself. Several borderline cases were considered. A test stand for measuring the charge accumulated by grain in the cyclone is presented. Obtained experimental studies confirm the conclusions derived from theoretical model. The usefulness of the cyclone for grain's electrification is confirmed as well. The device allows to reach significant electric charge compared to other equipment (e.g.: vibrating tables). **Theoretical and practical aspects of the particles charging by friction.**

**Słowa kluczowe:** separacja elektrostatyczna, separator odchylający, elektryzowanie tryboelektryczne, cyklon jako urządzenie do elektryzowania, praca wyjścia.

**Keywords:** electrostatic separation, deflecting separator, triboelectric effect of particles electrization, cyclone as an installation for generating charges, workfunction.

### Wstęp

Badania nad separacją mieszanin proszkowych metodami elektrycznymi podejmowane są stosunkowo rzadko. Powodem są trudności w selektywnym (różnoimiennym) naelektryzowaniu ziaren wzbogacanego minerału i ziaren będących zanieczyszczeniami. Proces elektryzowania ziaren mieszanin proszkowych jest zagadnieniem złożonym. Na jego przebieg wpływa zmienność wielu istotnych parametrów, co przy analizie i interpretacji rezultatów wymaga przyjęcia daleko idących uproszczeń. Specyfika elektryzacji ziaren powoduje, że tylko nieliczne wielkości mogą podlegać regulacji w trakcie eksploatacji urządzenia elektryzującego. Większość tych wielkości jest narzucona z góry bądź przez parametry konstrukcyjne urządzenia elektryzującego, bądź przez właściwości materiału poddawanego elektryzacji.

Celem pracy jest teoretyczna analiza możliwości wykorzystania efektu tryboelektrycznego do elektryzowania ziaren. Autorzy przedstawili model umożliwiający dobór materiału elektryzatora w zależności od pracy wyjścia zarówno ziaren jak i elektryzatora. Rozpatrzono kilka przypadków granicznych. Przedstawiono także stanowisko badawcze do pomiaru ładunku nabytego przez ziarna w procesie ich elektryzowania w cyklonie.

### Separacja elektryczna

Efektywność separacji elektrycznej jest funkcją natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$  oraz wielkości ładunku  $q$  nabytego przez ziarna. Pokazuje to zależność (1), która opisuje siłę elektroforezy działającą na ziarno w strefie separacji:

$$(1) \quad \vec{F} = q\vec{E}$$

Nabywanie ładunków przez ziarna 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 do 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 stykają. Proces elektryzowania ziaren przez tarcie jest przedmiotem rozważań artykułu.

### Elektryzowanie ziaren minerałów metodą tryboelektryczną

Dielektryki, którymi zazwyczaj są ziarna rozdzielanych minerałów, charakteryzują się pasmową strukturą budowy. Przy kontakcie dwóch ciał o różnej koncentracji nośników ładunków (elektronów, dziur, jonów), zachodzi proces ich wymiany aż do ustalenia równowagi koncentracji tych ładunków. W praktyce elektryzowania tryboelektrycznego spotyka się dwa sposoby elektryzacji: poprzez kontakt wszystkich ziaren mieszaniny minerałów z powierzchnią elektryzatora, lub poprzez wzajemny kontakt ziaren między sobą. Ponieważ większość elektryzatorów wykonana jest z metalu, zaś większość minerałów jest półprzewodnikami, pierwszy przypadek można rozpatrywać jako kontakt półprzewodnika z metalem. W takim przypadku elektrony będą przedostawać się z metalu do półprzewodnika, jeśli praca wyjścia półprzewodnika  $\varphi_p$  będzie większa od pracy wyjścia metalu  $\varphi_m$ . Odwrotnemu procesowi przeciwstawia się energetyczna bariera potencjału. W innym przypadku (wzajemny kontakt ziaren różnych minerałów) elektryzowanie ziaren zachodzi na drodze dyfuzji elektronów z półprzewodnika typu „n” o większej koncentracji tych ładunków, do półprzewodnika typu „p” (gdzie ich koncentracja jest mniejsza). Dziury natomiast dyfundują w kierunku przeciwnym. Fizyczne podstawy procesu wymiany ładunków można znaleźć m. in. w [2]. Proces ustalania równowagi koncentracji nośników ładunków jest określony sumą przejść nośników ładunków ze wszystkich pasm. W wyniku tych przejść powstaje podwójna warstwa elektryczna, której różnica potencjałów wynosi:

$$(2) \quad V_k = \frac{\varphi_k}{e}$$

gdzie:  $\varphi_k = \varphi_m - \varphi_p$  - różnica prac wyjścia metalu i półprzewodnika,  $e$  - ładunek elektronu.

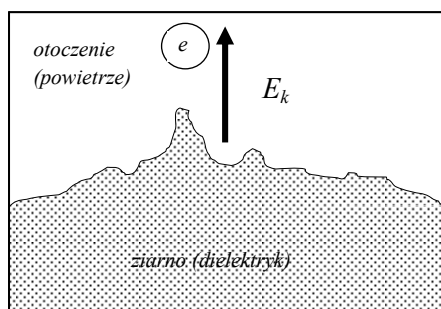
Po przerwaniu kontaktu na stykających się powierzchniach pozostają ładunki. Elektryzowanie przez tarcie jest odmianą opisanego procesu nabywania ładunków podczas kontaktu. Tarcie powoduje wzajemne przemieszczanie się zetkniętych powierzchni, co korzystnie wpływa na wartość nabywanych ładunków. W rezultacie powtarzania opisanego elementarnego procesu kontaktu, na powierzchniach

ziaren minerałów różniących się właściwościami fizycznymi, powstają ładunki o różnych znakach i różnych wartościach. Ładunki te zlokalizowane są w warstwie zewnętrznej, dlatego ich wielkość uwarunkowana jest stanem powierzchni.

Elektryzacja przez tarcie jest procesem dynamicznym. Kinetyka tego procesu (zderzenia, tarcie) jest przyczyną zmian struktury powierzchniowej elektryzujących się materiałów. Mikrodeformacje i mikropęknięcia powierzchni mogą być przyczyną powstawania dodatkowych poziomów energetycznych, a więc wpływać na zmianę pracy wyjścia elektronów. Zmiany te mogą w istotny sposób decydować o końcowym rezultacie ładowania tryboelektrycznego. Ze względu na wspomnianą kinetykę procesu, wartość uzyskiwanych ładunków przez ziarna jest wynikiem dwóch przeciwstawnych efektów:

1. nabywania ładunków na skutek wymiany nośników ładunków pomiędzy elektryzatorem i ziarnem (a także między ziarnami) w obszarze ich kontaktu. Decyduje o tym głównie: różnica prac wyjścia kontaktujących się materiałów, wielkość i stan stykających się powierzchni, siła docisku ziaren do elektryzatora,
2. utraty nabytych ładunków (rozładowania). Jest to proces niekorzystny, a wpływają na niego głównie: przewodność powierzchniowa ziaren, wyładowania i autoemisja ładunków z powierzchni ziaren.

W grupie efektów niekorzystnych, wymienić można np.: wyładowania z mikrodeformacji powierzchni i autoemisji. Występują w chwili przekroczenia wartości natężenia pola elektrycznego w otoczeniu mikrodeformacji powyżej wartości krytycznej  $E_k$ . Pokazano to schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Wyładowania i autoemisja elektronów z mikrodeformacji powierzchni ziarna

Kinetykę zmian wartości ładunku  $q$  na ziarnie podczas jego tarcia o powierzchnię elektryzatora można opisać równaniem:

$$(3) \quad \frac{dq}{dt} = \alpha(q_s - q) - \beta \cdot q$$

stąd:

$$(4) \quad q = \frac{q_s}{1 + \beta/\alpha} [1 - e^{-(\alpha+\beta)t}]$$

Maksymalna wartość ładunku ziarna:

$$(5) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} q = q_{max} = \frac{q_s}{1 + \beta/\alpha}$$

gdzie:  $q_{max}$  – wartość ładunku odpowiadająca rzeczywistemu nasyceniu (wartość maksymalna ładunku obserwowanego w eksperymencie elektryzacji),  $q_s$  – teoretyczny ładunek nasycenia przy braku efektów rozładowania,  $\alpha$  – współczynnik charakteryzujący gęstość prądu ładowania,  $\beta$  – współczynnik charakteryzujący gęstość prądu rozładowania.

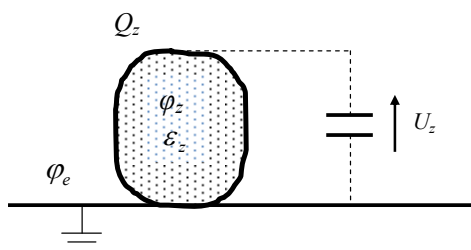
Współczynniki  $\alpha$  i  $\beta$  określa się najczęściej na drodze badań eksperymentalnych.

### Teoretyczny model doboru materiału elektryzatora

Według badań prezentowanych w szeregu opracowań, np. [1, 2] materiał elektryzatora powinien spełniać następujące warunki:

- różnice w wartościach prac wyjścia ziaren minerałów i elektryzatora powinny być duże, wówczas ziarna nabywają ładunki o znacznej wartości,
- wartość pracy wyjścia elektryzatora powinna być wielkością pośrednią pomiędzy wartościami prac wyjścia rozdzielanych składników mieszaniny minerałów. Spełnienie tego warunku gwarantuje powstanie różnoimiennych ładunków na ziarnach tych składników, czyli prowadzi do elektryzacji selektywnej. Elektryzator jest w takim przypadku jedynie swego rodzaju wymiennikiem nośników ładunków przejmując je od jednego rodzaju ziaren, a oddając drugiemu.

Autorzy proponują przeprowadzenie teoretycznej analizy doboru elektryzatora (metalowego) dla dwóch rozdzielanych minerałów o różnych pracach wyjścia, przy założeniu takich samych warunków kontaktu minerałów z elektryzatorem (identyczny kształt i wymiary ziaren, taka sama powierzchnia kontaktu). Inspiracją stworzenia modelu była sugestia dr M. Szczerbińskiego [3].



Rys. 2. Schemat kontaktu ziarna mineralu z elektryzatorem (metalem)

Rozważa się model kontaktu ziarna w kształcie nieregularnej elipsy (rysunek 2) z metalową, uziemioną płytą elektryzatora przyjmując następujące oznaczenia:

$U_z$  – napięcie kontaktowe między ziarnem a elektryzatorem:

$$(6) \quad U_z = \frac{\varphi_e - \varphi_z}{e}$$

$\varphi_e$  – praca wyjścia elektryzatora [eV],  $\varphi_z$  – praca wyjścia ziarna [eV],  $Q_z$  – ładunek zgromadzony na ziarnie [C],  $C_z$  – pojemność zastępcza układu ziarno - elektryzator [F].

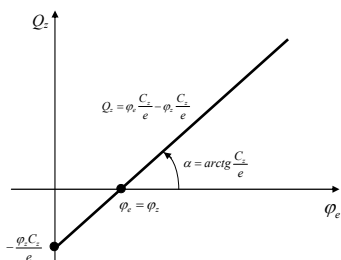
Ładunek ziarna wyrazić można zależnością:

$$(7) \quad Q_z = U_z \cdot C_z = \frac{\varphi_e - \varphi_z}{e} C_z$$

lub po przekształceniu:

$$(7a) \quad Q_z = \varphi_e \cdot \frac{C_z}{e} - \varphi_z \cdot \frac{C_z}{e}$$

Równanie (7a) jest równaniem linii prostej w układzie kartezjańskim w postaci:  $y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha + b$ , przy czym:  $y = Q_z$  jest zmienną zależną w równaniu (7a),  $x = \varphi_e$  – zmienna niezależna,  $\operatorname{tg} \alpha = C_z/e$  – współczynnik nachylenia prostej (ma zawsze wartość dodatnią, gdyż  $C_z > 0$  i  $e > 0$ ), natomiast  $b = \frac{\varphi_z C_z}{e}$  jest wyrazem wolnym równania ( $b > 0$ , ponieważ  $\varphi_z > 0$ ,  $C_z > 0$ ,  $e > 0$ ). Prosta opisana równaniem (7a) przebiega w sposób pokazany na rysunku 3.

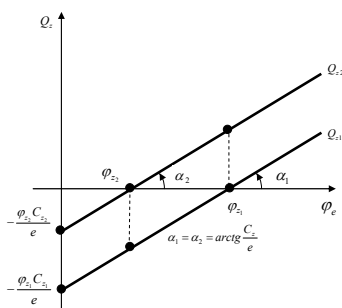


Rys. 3. Zależność ładunku ziarna mineralu  $Q_z$  od pracy wyjścia elektryzatora  $\varphi_e$  (wzór 7a)

Rozpatrzone zostaną 3 możliwe przypadki kontaktu ziaren z elektryzatorem w zależności od przenikalności elektrycznej  $\epsilon$  ziaren mineralów. Wszystkie oznaczenia dotyczące ziaren dwóch różnych mineralów opatrzone są indeksami "1" i "2", przy czym założono, że zawsze zachodzi nierówność:  $\varphi_{z_1} > \varphi_{z_2}$ .

**Przypadek I:**  $\epsilon_{z_1} = \epsilon_{z_2}$ ,  $C_{z_1} = C_{z_2} = C_z$

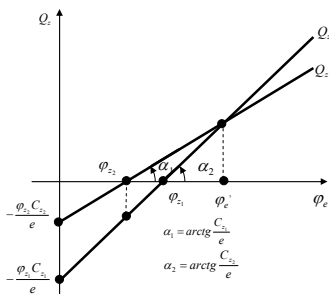
Zależność  $Q_z = f(\varphi)$  dla takiego przypadku pokazana jest na rysunku 4.



Rys. 4. Zależność  $Q_z = f(\varphi_e)$  dla dwóch mineralów,  $\epsilon_{z_1} = \epsilon_{z_2}$ ,  $C_{z_1} = C_{z_2} = C_z$

Jak widać z rysunku 4, różniamienną elektryzację ziaren uzyskuje się przy wartościach prac wyjścia elektryzatora zawartych w przedziale:  $\varphi_{z_1}, \varphi_{z_2}$ . Ładunki zgromadzone na ziarnach będą równe co do wartości i przeciwne co do znaku, jeśli:  $\varphi_e = (\varphi_{z_1} + \varphi_{z_2})/2$ .

**Przypadek II:**  $\epsilon_{z_1} > \epsilon_{z_2} \rightarrow C_{z_1} > C_{z_2}$



Rys. 5. Zależność  $Q_z = f(\varphi_e)$  dla dwóch mineralów,  $\epsilon_{z_1} > \epsilon_{z_2}$

Aby uzyskać różniamienną elektryzację ziaren, wartość pracy wyjścia elektryzatora powinna być zawarta w przedziale  $\varphi_{z_1}, \varphi_{z_2}$ , jednakże jej optymalna wartość powinna wynosić  $\varphi_e \geq \varphi_{z_2}$ , wówczas różnica między ładunkami obu ziaren będzie największa (obrazuje to wykres pokazany na

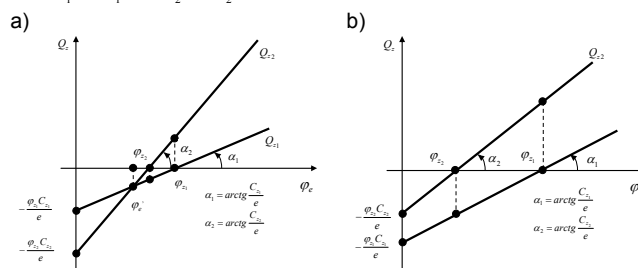
rysunku 5). Przypadek ten ( $\varphi_{z_1} > \varphi_{z_2}$  i  $\epsilon_{z_1} > \epsilon_{z_2}$ ) jest niezgodny z fenomenologiczną regułą Coehna [1], wg której ciało o większej stałej dielektrycznej elektryzuje się dodatnio przy zetknięciu z ciałem o stałej dielektrycznej mniejszej. Reguła Cohena ma liczne wyjątki, które stawiają pod znakiem zapytania jej użyteczność, dlatego należy włączyć do rozważań i ten przypadek.

**Przypadek III:**  $\epsilon_{z_1} < \epsilon_{z_2} \rightarrow C_{z_1} < C_{z_2}$

W przypadku tym należy rozważyć dwie możliwości:

a)  $\varphi_{z_1} \cdot C_{z_1} < \varphi_{z_2} \cdot C_{z_2}$

b)  $\varphi_{z_1} \cdot C_{z_1} > \varphi_{z_2} \cdot C_{z_2}$



Rys. 6. Zależność  $Q_z = f(\varphi_e)$  dla dwóch mineralów,  $\epsilon_{z_1} < \epsilon_{z_2}$ ,

a)  $\varphi_{z_1} \cdot C_{z_1} < \varphi_{z_2} \cdot C_{z_2}$ , b)  $\varphi_{z_1} \cdot C_{z_1} > \varphi_{z_2} \cdot C_{z_2}$

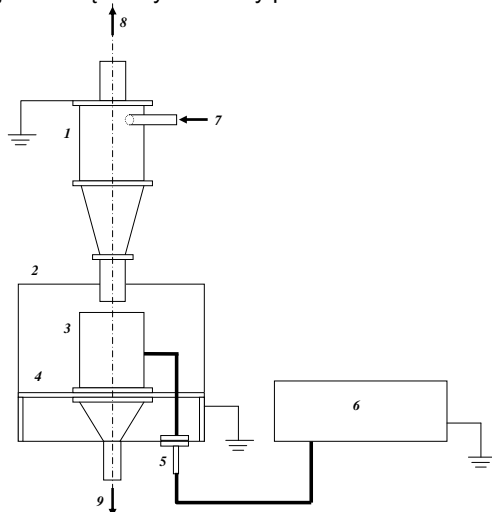
W obu tych wariantach selektywność ładowania spełniona będzie, gdy  $\varphi_e \in (\varphi_{z_1}, \varphi_{z_2})$ , dla uzyskania największych różnic ładunków na ziarnach celowym jest jednak, by  $\varphi_e \leq \varphi_{z_1}$ . Obrazują to wykresy na rysunku 6a i 6b.

Teoretyczna analiza doboru elektryzatora w celu selektywnego naładowania dwóch mineralów o różnych pracach wyjścia wykazała w sposób poglądowy konieczność spełnienia warunku  $\varphi_e \in (\varphi_{z_1}, \varphi_{z_2})$ . Dobór elektryzatora powinien odbywać się dla każdej rozdzielanej pary mineralów z uwzględnieniem ich właściwości, co gwarantuje prawidłowy rozdział w polu elektrycznym.

### Badania eksperymentalne pomiaru ładunku elektryzowanych przez tarcie ziaren

W [5] opisano układ pomiaru ładunków ziaren poddawanych elektryzowaniu metodą tryboelektryczną (rysunek 7). Ziarna transportowane pneumatycznie powietrzem do cyklonu, trąc o jego ścianki, elektryzują się. Cząstki z nabytym ładunkiem opadają do metalowego pojemnika połączony sondą pomiarową z elektrometrem. Pojemnik jest izolowany i umieszczony w puszcze Faradaya w celu uniknięcia wpływu czynników zewnętrznych na wynik pomiaru. Powietrze transportujące wydostaje się z cyklonu kominem wylotowym. Gromadzące się w pojemniku ziarna powodują pojawienie się ładunku przestrzennego, który oddziałując na następne naelektryzowane cząstki wpadające do pojemnika, zakłóca pomiar. W celu uniknięcia tego niekorzystnego zjawiska, dno pojemnika wykonano z metalowej siatki i zastosowano dodatkowy ciąg powietrza. Wartość zgromadzonego ładunku mierzono elektrometrem połączonym z układem pomiarowym ekranowaną sondą. Opisywane rezultaty badań prowadzone były na wcześniej wytypowanych ziarnach węgla niskopopiołowego i substancji mineralnej (pirycie, piaskowcu, ilowcu, łupku węglowym). Badania prowadzono w stałym reżimie pracy układu, badane próbki były suszone i utrzymywane w stałej temperaturze, również parametry powietrza transportującego były stałe.

Zmierzoną wartość ładunku kilku gramów ziaren przelicza-  
na na jednostkę masy. Pomiaru powtarzano kilkakrotnie.



Rys. 7. Schemat układu do pomiaru ładunków ziaren:  
1 – elektryzator (cyklon), 2 – puszka Faradaya, 3 – zbiornik naelektryzowa-  
nych ziaren, 4 – układ izolacyjny 5 – sonda pomiarowa, 6 – elektrometr,  
7 – wlot do cyklonu, 8 – wylot gazu z cyklonu, 9 – odciąg powietrza

Wykonane przez autorów eksperymenty i prezentowane  
w [4, 5, 6] rezultaty stanowią ważny przyczynek do rozpo-  
znania zjawiska elektryzowania ziaren węgla i materii mine-  
ralnej metodą tryboelektryczną. Świadczą one o możliwości  
naelektryzowania ziaren tych substancji w sposób selek-  
tywny (różnoimiennie). Gwarantuje to dobór odpowiedniego  
materiału, z którego wykonano elektryzator (cyklon). Przy-  
kładowe rezultaty badań zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wielkość i znak ładunków tryboelektrycznych cząstek  
węgla niskopopiołowego i substancji mineralnej w zależności od  
materiału elektryzatora (cyklonu)  
(granulacja cząstek: 0,3 – 0,43 mm; prędkość wlotowa do cyklonu: 6,0 m/s;  
cyklon w czasie pomiaru uziemiony)

Materiał cyklonu	Rodzaj bada- nych cząstek	Wartość i znak ładunku
Stal ocynkowana	węgiel	+162 · 10 <sup>-10</sup>
	piryt	-6,65 · 10 <sup>-10</sup>
	łupek węglowy	-240 · 10 <sup>-10</sup>
	iłowiec	-19,0 · 10 <sup>-10</sup>
	piaskowiec	-41,0 · 10 <sup>-10</sup>
Stal nierdzewna	węgiel	+110 · 10 <sup>-10</sup>
	piryt	-6,50 · 10 <sup>-10</sup>
	łupek węglowy	-178 · 10 <sup>-10</sup>
	iłowiec	-33,0 · 10 <sup>-10</sup>
	piaskowiec	-52,0 · 10 <sup>-10</sup>
Miedź	węgiel	+220 · 10 <sup>-10</sup>
	piryt	-11,4 · 10 <sup>-10</sup>
	łupek węglowy	-186 · 10 <sup>-10</sup>
	iłowiec	-30,0 · 10 <sup>-10</sup>
	piaskowiec	-47,0 · 10 <sup>-10</sup>
Mosiądz	węgiel	+181 · 10 <sup>-10</sup>
	piryt	-6,15 · 10 <sup>-10</sup>
	łupek węglowy	-225 · 10 <sup>-10</sup>
	iłowiec	-67,0 · 10 <sup>-10</sup>
	piaskowiec	-64,0 · 10 <sup>-10</sup>

Cyklon - jako urządzenie elektryzujące - gwarantuje  
uzyskiwanie znacznych wartości ładunków, jednak, ze  
względu na specyfikę działania, wnosi pewne niedogodno-  
ści do procesu separacji. Wraz z gazem transportującym z  
cyklonu wydostaje się najdrobniejsza frakcja ziarnowa ma-  
teriału poddawanego elektryzowaniu (wprowadzanego do  
cyklonu). Nie wszystkie ziarna wprowadzane są więc do  
komory rozdziału separatora. Zakłóca to w oczywisty spo-  
sób ogólny bilans masy separowanych ziaren. Cyklon wy-  
maga zatem stosowania wąskich klas ziarnowych separo-  
wanego materiału. Istotny jest także wpływ naelektryzo-  
wanych ziaren z cyklonu i wprowadzenie ich w obszar pola  
elektrycznego. Wyływ powinien być laminarny, co jest  
gwarancją laminarnego ruchu strugi naelektryzowanych  
ziaren w komorze rozdziału separatora. Problem ten był  
dyskutowany w [6]. Cyklon – ze względu na specyfikę pracy  
– uniemożliwia taki wyływ. Doprowadzenie do równo-  
miernego wyływu ziaren – niezależnie od parametrów wej-  
ściowych – musi być przedmiotem rozwiązań konstrukcyj-  
nych wylotu z cyklonu.

## Wnioski

Modelowanie procesu elektryzowania ziaren metodą  
tryboelektryczną – mimo przyjęcia daleko idących uprosz-  
czeń – niesie ze sobą cenne informacje o doborze elektry-  
zatora w aspekcie wartości prac wyjścia trzech elementów:  
pary elektryzowanych ziaren (które muszą być rozdzielone  
siłą elektroforezy) i elektryzatora. Materiały, z których zbu-  
dowano cyklony (urządzenia elektryzujące): stal ocynkowa-  
na, stal nierdzewna, miedź, mosiądz, spełniają warunki  
różnoimiennnej elektryzacji ziaren, co jest podstawą sku-  
tecznego ich rozdzielania siłami pola elektrycznego.

Na podstawie uzyskanych rezultatów badań można  
sformułować podstawowy wniosek: cyklon wykorzystany  
jako urządzenie do elektryzowania ziaren przez tarcie po-  
zwala uzyskiwać znaczne wartości ładunków przy stosun-  
kowo niewielkim nakładzie energii. Łatwość zmian szeregu  
parametrów (np. prędkości wlotowej do cyklonu, stężenia  
ziaren w gazie transportującym) pozwala na sterowanie  
procesem elektryzacji w szerokim zakresie.

**Autorzy:** prof. *nz.* AGH, dr hab. inż. Antoni Cieśla, Akademia  
Górnicza - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al.  
Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: [aciesla@agh.edu.pl](mailto:aciesla@agh.edu.pl), dr  
inż. Mikołaj Skowron, Akademia Górnicza - Hutnicza, Katedra  
Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059  
Kraków, e-mail: [mskowro@agh.edu.pl](mailto:mskowro@agh.edu.pl) dr inż. Przemysław Syrek  
Akademia Górnicza - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektro-  
energetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: [syrekp@agh.edu.pl](mailto:syrekp@agh.edu.pl)

## LITERATURA

- [1] Pilch Wł., Polański W., Komorowska H., *Niektóre wyniki wzbogacania metodą tryboelektryczną wybranych surowców mineralnych*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 1977
- [2] Matsusaka S., Maruyama H., Matsumaya T., Ghadiri M.: *Triboelectric charging of powders: A review*, Chemical Engineering Science 65 (2010), 5781 – 5807.
- [3] Szczerbiński M.: *informacja prywatna*
- [4] Cieśla A.: *Tryboelektryzacja ziaren w cyklonie. Analiza wpływu wybranych czynników*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, 2015 R. 91 nr 12, s. 65–68.
- [5] Cieśla A, Skowron M., Syrek P.: *Elektryzacja ziaren węgla metodą tryboelektryczną*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 93, Nr. 1/2017, pp. 129 - 132.
- [6] Cieśla A.: *Badania eksperymentalne ruchu strugi naelektryzowanych ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 89, Nr. 12/2013, pp. 215 - 218.