

doi:10.15199/48.2017.01.31

Elektryzacja ziaren węgla metodą tryboelektryczną

Streszczenie. Węgiel energetyczny będący paliwem dla elektrowni, zawiera niejednokrotnie znaczne ilości popiołu (skała płonna) i siarki. Powoduje to m.in. pogorszenie właściwości paliwa, zmniejszenie wartości opałowej, korozję kotłów, itp. Podejmowane są więc próby usunięcia tych szkodliwych składników z węgla różnymi metodami. Jedną z suchych metod wzbogacenia minerałów, którą próbuje się wykorzystać do węgla, jest separacja elektrostatyczna. Warunkiem wykorzystania sił pola elektrycznego do wzbogacenia węgla jest nabycie przez cząstki węgla i substancji mineralnej (tworzącej po spaleniu popiół) ładunków elektrycznych. W niniejszym artykule przedstawiono podstawy elektryzowania cząstek metodą tryboelektryczną (przez tarcie), oraz opisano układ do pomiaru ładunków nabywanych przez ziarna. Zaprezentowano wyniki badań nad elektryzacją ziaren węgla i substancji mineralnej w zależności od materiału elektryzatora, prędkości wlotowej do cyklonu, granulacji cząstek i ich stężenia w powietrzu transportującym.

Abstract. Power coal, as a fuel to power plants, contains frequently considerable quantities of ash and sulphur. This causes deterioration of quality of the fuel, reduction of its heating value, corrosion of boilers, etc. The test of extraction of these harmful components from the coal by various methods are being undertaken. Electrostatic separation is one of the dry methods of beneficiations of minerals: it is tested to beneficiation of coal. In this article the principles of the electrification of grains by the triboelectric method (by friction) are briefly discussed and the measuring system is described. The results of the investigations of the electrification of coal grains are presented as dependence on the following parameters material of the cyclone, inlet speed into cyclone, granulation of the grains and concentration of the grains in transporting air. (**Electrification of coal grains by the triboelectric method.**)

Słowa kluczowe: separacja elektrostatyczna, elektryzowanie tryboelektryczne, cyklon jako urządzenie do elektryzowania, układ pomiarowy ładunków.

Keywords: electrostatic separation, triboelectric effect of electrization particles, cyclone as a installation for generating charges, measuring charge system.

Wstęp

Spośród znanych metod elektryzowania cząstek minerałów, interesującą wydaje się metoda ich ładowania przez tarcie (metoda tryboelektryczna). Podstawą tego typu procesu jest zjawisko elektryzacji kontaktowej. Zjawisko to jest złożone. Spośród istniejących hipotez tłumaczących elektryzację kontaktową, najbardziej prawdopodobna wydaje się hipoteza oparta na teorii strefowej struktury ciała stałego i zjawisk kontaktowych w półprzewodniku.

Większość minerałów naturalnych może być traktowana jako półprzewodniki domieszkowane. Przy kontakcie dwóch minerałów o różnej koncentracji nośników ładunków (elektronów, dziur), będzie zachodził dynamiczny proces ich wymiany, aż do ustalenia równowagi tej koncentracji. Po przerwaniu kontaktu, na powierzchniach minerałów pozostają różnoimienne ładunki.

Elektryzowanie przez tarcie jest odmianą procesu nabywania ładunków podczas kontaktu. Wzajemne przemieszczanie kontaktujących się powierzchni ułatwia wymianę ładunków.

Na końcową wartość ładunku nabytego przez cząstkę mają wpływ takie czynniki jak: wartości prac wyjścia kontaktujących się materiałów (zarówno cząstek minerałów jak i powierzchni elektryzatora z którymi się one stykają), wielkość kontaktujących się powierzchni, stan powierzchni cząstek, siła docisku cząstek do elektryzatora i inne [1,3].

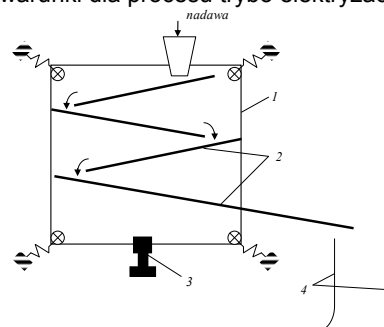
Zmiany struktury powierzchni spowodowane kinetyką procesu (zderzenia, tarcie) mogą również wpływać na końcowy rezultat ładowania tryboelektrycznego.

Do uzyskania znacznych wartości ładunku konieczne jest zapewnienie dobrego kontaktu cząstek z elektryzátorem. Można to osiągnąć stosując wibrujące płaszczyzny o regulowanej amplitudzie i częstotliwości (rys. 1.[3])

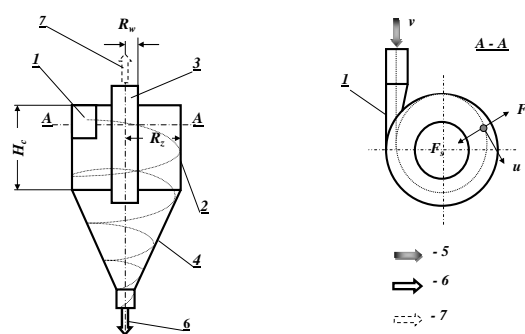
Innym, możliwym rozwiązaniem, jest zastosowanie cyklonu jako elektryzatora cząstek (rys.2. [2]). Takie rozwiązanie jest preferowane przez autorów artykułu.

Cząstki minerałów zawieszane w strumieniu gazu transportującego trą o ścianki cyklonu z siłą zależną od prędkości wlotowej. Znaczna siła docisku (siła odśrodkowa), możliwość jej stosunkowo łatwiej regulacji

oraz długi czas przebywania cząstki w cyklonie stwarzają korzystne warunki dla procesu tryboelektryzacji.



Rys. 1. Urządzenie do elektryzacji ziaren (płaszczyzny wibrujące o regulowanej amplitudzie i częstotliwości); 1 – kaseca, 2 – płaszczyzny elektryzatora, 3 – napęd, 4 – elektrody separatora [3]



Rys. 2. Zasada działania cyklonu (1 – króciec wlotowy, 2 – część cylindryczna (płaszcz cyklonu), 3 – rura wylotowa (komin cyklonu), 4 – część stożkowa cyklonu, 5 – mieszalnina gazu transportującego i ziaren, 6 – ziarna naelektryzowane, 7 – gaz transportujący)

Opisywane w literaturze badania nad ładowaniem tryboelektrycznym prowadzone były głównie na cząstkach rud metali, kwarcu, fosforytów i innych [3].

Stosunkowo rzadko podejmuje się takie badania w odniesieniu do węgla.

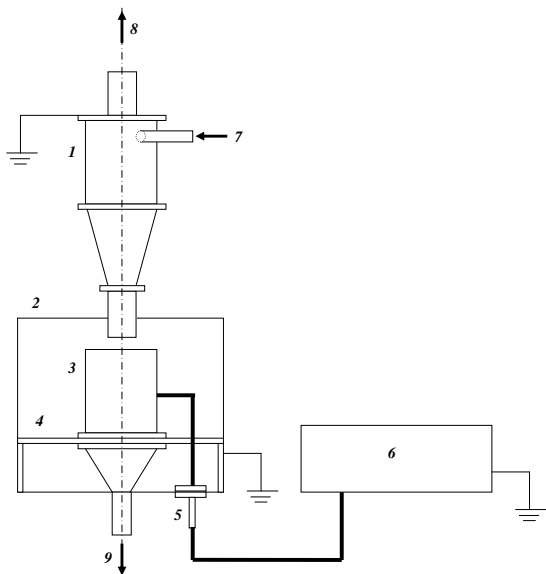
Węgiel pod względem chemicznym stanowi mieszaninę właściwej (organicznej) substancji węglowej z substancją mineralną i wodą. Niekiedy, zwłaszcza przy dużym

zasiarczeniu i zapopieleniu węgla (decyduje o tym zawartość substancji mineralnej), konieczne jest usunięcie tych szkodliwych komponentów. Jednym ze sposobów – jak powyżej zauważono – jest separacja elektrostatyczna.

Elektroseparacja węgla polega na oddzieleniu substancji mineralnej od substancji węglowej siłami pola elektrycznego. Pożądanym warunkiem do selektywnego działania pola elektrycznego na cząstki węgla i substancji mineralnej, a zatem do skutecznego ich rozdzielania, jest uzyskanie przez te cząstki różnoimiennych ładunków o znacznej wartości.

Układ pomiarowy i warunki pomiaru

Badania nad tryboelektryzacją cząstek prowadzono w układzie pokazanym na rys. 3.



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

Ziarna transportowane pneumatycznie powietrzem do cyklonu, trąc o jego ścianki, elektryzują się. Cząstki z nabytym ładunkiem opadają do metalowego pojemnika połączonego 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 (zawartość popiołu ~1,6%) 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 przeliczano na jednostkę masy. Pomiaru powtarzano kilkakrotnie.

Badania i dyskusja rezultatów

Zależność wielkości i znaku ładunku tryboelektrycznego cząstek od materiału elektryzatora

Od właściwości materiału elektryzatora zależy zarówno znak jak i wielkość nabytego przez cząstkę ładunku. Właściwością materiału, która ma decydujący wpływ na elektryzację jest jego praca wyjścia. W przypadku dwóch materiałów o różnych pracach wyjścia, materiał mający większą jej wartość elektryzuje się ujemnie, natomiast materiał mający mniejszą pracę wyjścia – dodatnio. Chcąc uzyskać selektywną (różnoimienną) elektryzację dwóch składników nadawy, należy zastosować elektryzator, którego praca wyjścia jest wielkością pośrednią. W celu dobrania materiału elektryzatora konieczną jest zatem znajomość pracy wyjścia zarówno materiału mającego spełniać rolę elektryzatora, jak i rozdzielanych minerałów. Pomiary pracy wyjścia są jednak złożone, a otrzymywane rezultaty zależą w znacznym stopniu od metody jak warunków pomiarów. Za [3] autorzy przytaczają w Tabeli 1 wartości pracy wyjścia kilku przykładowych minerałów.

Tabela 1. Wartości prac wyjścia ϕ wybranych minerałów [3]

Minerał	Praca wyjścia ϕ [eV]
Piryt	5,35
Hematyt	5,25
Galena	4,95
Kwarc	4,65
Dolomit	4,44
Fluoryt	3,50
Kalcyt	3,20

Przykładowe wartości pracy wyjścia dla: miedzi $\phi = 4,74$ [eV], niklu $\phi = 4,80$ [eV], perspeksu $\phi = 2,70$ [eV] [3].

Z powyższych względów obserwuje się więc tendencję do eksperymentalnego doboru materiałów elektryzatora dla rozdzielanych frakcji minerałów poprzez pomiar wielkości i znaku nabytych na danym materiale ładunków.

Badania nad elektryzacją cząstek węgla i substancji mineralnej prowadzono w cyklonach wykonano z kilku materiałów. Cyklony w czasie prób były uziemione. Wyniki pomiarów zestawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. 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)

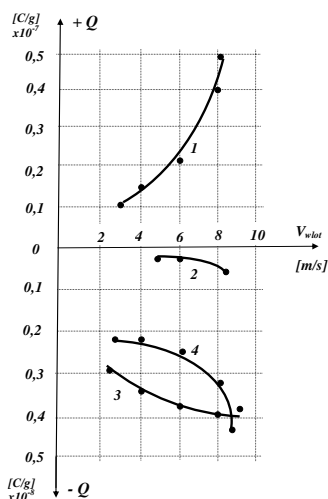
Materiał cyklonu	Rodzaj badanych cząstek	Wartość i znak ładunku
Stal ocynkowana	węgiel	$+162 \cdot 10^{-10}$
	piryt	$-6,65 \cdot 10^{-10}$
	łupek węglowy	$-240 \cdot 10^{-10}$
	ilowiec	$-19,0 \cdot 10^{-10}$
	piaskowiec	$-41,0 \cdot 10^{-10}$
Stal nierdzewna	węgiel	$+110 \cdot 10^{-10}$
	piryt	$-6,50 \cdot 10^{-10}$
	łupek węglowy	$-178 \cdot 10^{-10}$
	ilowiec	$-33,0 \cdot 10^{-10}$
	piaskowiec	$-52,0 \cdot 10^{-10}$
Miedź	węgiel	$+220 \cdot 10^{-10}$
	piryt	$-11,4 \cdot 10^{-10}$
	łupek węglowy	$-186 \cdot 10^{-10}$
	ilowiec	$-30,0 \cdot 10^{-10}$
	piaskowiec	$-47,0 \cdot 10^{-10}$
Mosiądz	węgiel	$+181 \cdot 10^{-10}$
	piryt	$-6,15 \cdot 10^{-10}$
	łupek węglowy	$-225 \cdot 10^{-10}$
	ilowiec	$-67,0 \cdot 10^{-10}$
	piaskowiec	$-64,0 \cdot 10^{-10}$

Analizując otrzymane rezultaty elektryzowania ziaren, można sformułować następujące wnioski:

- przebadane materiały elektryzatora (cyklonu) spełniają warunek selektywnej elektryzacji: cząstki węgla elektryzują się dodatnio, natomiast substancji mineralnej – ujemnie. Fakt ten stwarza realne możliwości wykorzystania efektu tryboelektrycznego i siły elektroforezy do elektroseparatora węgla,
- jak wspomniano, ziarna węgla nabywają dodatni ładunek na badanych materiałach elektryzatora, natomiast cząstki substancji mineralnej – ujemnie. Jednak różnice w wartościach nabytych ładunków są niezbyt duże. Świadczyć to może o niewielkie różnice prac wyjścia badanych materiałów. Konieczne jest zatem kontynuowanie badań, których celem będzie poszukiwanie bardziej przydatnych materiałów do budowy elektryzatora.

Zależność ładunku tryboelektrycznego cząstek od prędkości wlotowej do cyklonu

Jednym ze sposobów tryboelektryzacji ziaren jest elektryzacja na wibrującej płaszczyźnie (rys. 1). Elektryzacja tym sposobem pozwala na osiągnięcie wartości ładunków stanowiących zaledwie (1 – 1,6) % wartości ładunku maksymalnego q_m (jest to teoretyczna wartość ładunku obliczona zgodnie z zasadą granicznej gęstości ładunku [2]. Jak pokazano w [2], wykorzystując do elektryzowania ziaren cyklon, wartości ładunków mogą osiągać nawet (10 – 35) % q_m . Wynika stąd, że w celu uzyskania dużych wartości ładunków należy prowadzić proces elektryzowania w urządzeniu zapewniającym ziarnom znaczne wartości energii kinetycznej. Energia ta jest użytkowana na realizację intensywniejszego kontaktu pomiędzy ziarnami, a przede wszystkim między ziarnami a powierzchnią elektryzatora. Cyklon stwarza takie możliwości poprzez łatwą regulację prędkości wlotowej w szerokich granicach. Przeprowadzone eksperymenty wykazały silną zależność ładunku badanych cząstek od prędkości wlotowej gazu transportującego do cyklonu (rys. 4).



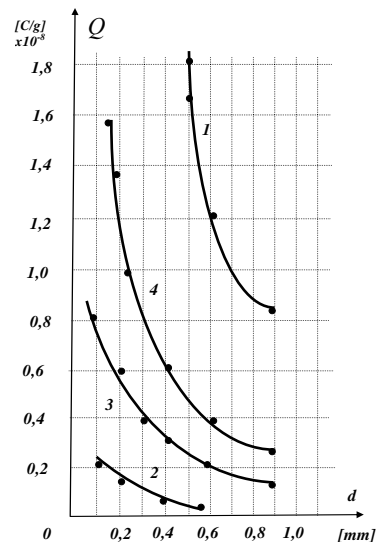
Rys. 4. Zależność ładunku jednostkowego ziaren Q [C/g] od prędkości wlotowej do cyklonu V_{wlot} [m/s] dla różnych rodzajów ziaren (1 – węgiel, 2 – pirit, 3 – łupek węglowy, 4 – ilowiec (prędkość wlotowa do cyklonu 6 m/s, granulacja cząstek: 0,3 – 0,43 mm; materiał cyklonu: stal ocynkowana)

Ze wzrostem prędkości wlotowej gazu (a tym samym i cząstek) do cyklonu, wzrasta siła tarcia cząstek o ścianki cyklonu (patrz rys. 1). Charakter zależności nabywanego ładunku od prędkości wlotowej jest taki sam dla wszystkich rodzajów badanych materiałów. Dla zaproponowanej konstrukcji elektryzatora i jego gabarytów, zakres zmian

prędkości wlotowej do cyklonu był ograniczony do wartości (3 – 8) m/s.

Wpływ granulacji ziaren na wartość ładunku tryboelektrycznego

Wartość nabywanych ładunków w procesie ich tryboelektryzacji zależy w dużej mierze od wielkości kontaktujących się powierzchni. Wzrost granulacji ziaren, a więc wzrost powierzchni kontaktu ułatwia wymianę ładunków między ziarnem a elektryzатorem. Badania nad wpływem granulacji cząstek na ich ładunek prowadzono na kilku klasach ziarnowych cząstek. Zmierzony ładunek ziaren odniesiony do jednostki masy i wyrażony w [C/g] zależy odwrotnie proporcjonalnie od ich granulacji (rys. 5).



Rys. 5. Zależność ładunku jednostkowego ziaren Q [C/g] od granulacji d dla różnych rodzajów cząstek (1 – węgiel, 2 – pirit, 3 – łupek węglowy, 4 – ilowiec (prędkość wlotowa do cyklonu 6 m/s, materiał cyklonu: stal ocynkowana)

Tabela 3. Wartości ładunków pojedynczych cząstek (materiał cyklonu: stal ocynkowana, prędkość wlotowa do cyklonu: 6,0 m/s; cyklon w czasie pomiaru uziemiony)

Klasa ziarnowa [mm]	Rodzaj badanych cząstek	Wartość i znak ładunku
0,1 ÷ 0,2	węgiel	$0,262 \cdot 10^{-12}$
	pirit	$1,36 \cdot 10^{-14}$
	łupek węglowy	$2,10 \cdot 10^{-14}$
	iłowiec	$6,15 \cdot 10^{-14}$
0,3 ÷ 0,43	węgiel	$1,40 \cdot 10^{-12}$
	pirit	$6,10 \cdot 10^{-14}$
	łupek węglowy	$14,10 \cdot 10^{-14}$
	iłowiec	$42,0 \cdot 10^{-14}$
0,6 ÷ 0,8	węgiel	$3,90 \cdot 10^{-12}$
	pirit	— ¹⁾
	łupek węglowy	$45,8 \cdot 10^{-14}$
	iłowiec	$84 \cdot 10^{-14}$

—¹⁾ - nie badano ze względu na osadzanie ziaren podczas transportu w przewodzie doprowadzającym.

Przeliczając wartości pomierzonych ładunków dla pojedynczych ziaren, można – na podstawie prezentowanych w tabeli 3 danych – że ze wzrostem granulacji ziaren rośnie ich ładunek.

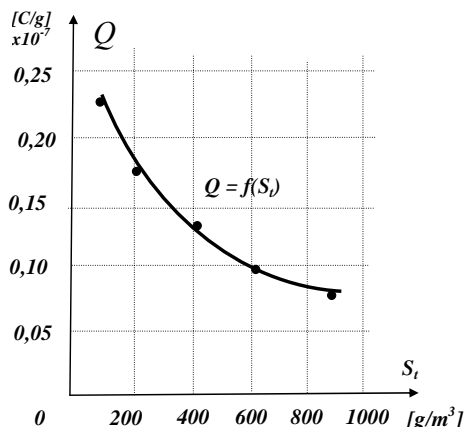
Wpływ stężenia ziaren w gazie transportującym na wartość ładunku

Pod pojęciem stężenia autorzy rozumieją stosunek masy ziaren do objętości gazu transportującego przepływającego w jednostce czasu:

$$(1) \quad S_t = \frac{m}{Avt} \quad [\text{g/m}^3],$$

gdzie: m – masa ziaren [g], Avt – objętość przepływającego gazu przez przewód o przekroju A z prędkością v w czasie t [m³].

Regulacji stężenia dokonywano poprzez zmianę liczby ziaren do przewodu transportującego przy stałej prędkości wlotowej do cyklonu. Wyniki badań świadczą o silnej zależności ładunku ziaren od ich stężenia. Dla większych wartości stężenia ładunek osiąga mniejszą wartość (rys. 6).



Rys. 6. Zależność ładunku jednostkowego ziarna Q [C/g] od stężenia nadawy w powietrzu S_t dla węgla (granulacja 0,43 – 0,3 mm, prędkość wlotowa do cyklonu 6 m/s)

Zaobserwowane zjawisko autorzy tłumaczą pogarszaniem się warunków kontaktu ziaren z elektryzatorem. Ponadto, przy dużych stężeniach istnieje większe prawdopodobieństwo wzajemnego kontaktu ziaren. Sprzyja to wymianie ładunków między nimi ale także rozładowaniu i w efekcie również prowadzi do zmniejszenia końcowej wartości ładunków. Stężenia ziaren jest istotnym parametrem technologicznym, limituje ono bowiem wydajność urządzenia elektryzującego, a tym samym całego separatora. Charakter otrzymanej zależności nie pozwala na określenie optymalnej wartości stężenia ziaren w nadawie.

Podsumowanie

Prezentowane rezultaty stanowią ważny przyczynek do rozpoznania zjawiska elektryzowania ziaren węgla i materii

mineralnej metodą tryboelektryczną. Świadczą one o możliwości naelektryzowania ziaren tych substancji w sposób selektywny (różnoimiennie). Gwarantuje to dobór odpowiedniego materiału, z którego wykonano elektryzator (cyklon). Cyklon - jako urządzenie elektryzujące - gwarantuje także uzyskiwanie znacznych wartości ładunków, jednak, ze względu na specyfikę działania, wnosi pewne niedogodności do procesu separacji. Wraz z gazem transportującym z cyklonu wydostaje się najdrobniejsza frakcja ziarnowa materiału poddawanego elektryzowaniu (wprowadzanego do cyklonu). Nie wszystkie ziarna wprowadzane są więc do komory rozdziału separatora. Zakłóca to w oczywisty sposób ogólny bilans masy separowanych ziaren. Cyklon wymaga zatem stosowania wąskich klas ziarnowych separowanego materiału. Istotny jest także wpływ naelektryzowanych ziaren z cyklonu i wprowadzenie ich w obszar pola elektrycznego (rys. 1). Wpływ powinien być laminarny, co jest gwarancją laminarnego ruchu strugi naelektryzowanych ziaren w komorze rozdziału separatora. Problem ten był dyskutowany w [2]. Cyklon – ze względu na specyfikę pracy – uniemożliwia taki wypływ. Doprowadzenie do równomiernego wypływu ziaren – niezależnie od parametrów wejściowych – musi być przedmiotem rozwiązań konstrukcyjnych wylotu z cyklonu.

Autorzy: prof.nz. AGH, dr hab. inż. Antoni **Cieśla**, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: aciesla@agh.edu.pl, dr inż. Mikołaj **Skowron**, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: mskowro@agh.edu.pl, dr inż. Przemysław **Syrek**, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: syrekp@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Carta M., Ferrara G., Del Fa C., Ciccu R.: *Progress dans la theorie et l'application de la separation on triboelectrique des minerais*. Revue de l'Industrie Minerale, mai 1969.
- [2] Cieśla A.: *Tryboelektryzacja ziaren w cyklonie. Analiza wpływu wybranych czynników*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, 2015 R. 91 nr 12, s. 65–68.
- [3] Pilch Wł., Polański W., Komorowska H., *Niektóre wyniki wzbogacania metodą tryboelektryczną wybranych surowców mineralnych*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 1977