

Tryboelektryzacja ziaren w cyklonie. Analiza wpływu wybranych czynników

Streszczenie. Proces elektryzowania ziaren mieszanin proszkowych jest pierwszym etapem ich elektroseparatoracji. W pracy poddano analizie wpływ niektórych parametrów decydujących o przebiegu elektryzowania ziaren przez tarcie (metoda tryboelektryzacji). Jako urządzenie do elektryzowania zaproponowano cyklon. Skoncentrowano się głównie na zbadaniu zależności ładunku ziaren od ich granulacji i prędkości wlotowej do cyklonu. Wynikiem przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych rezultatów jest stwierdzenie przydatności cyklonu do elektryzacji ziaren. Pozwala on bowiem na uzyskiwanie znacznych wartości ładunków w porównaniu z innymi urządzeniami (np. wibrującymi płytami).

Abstract. Process of the generating charges 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 analysed. Cyclone was the installation for generating charges. The dependence of electrical charges of grains versus granulation and inlet speed has been established. These investigations lead us to regard that cyclone is useful to generation of charging on particles. The charges generated on particles in cyclone are considerably greater than in other installations (for example vibrating table). **Triboelectric method of generating charges on particles in the cyclone. Analysis of the influence of selected parameters**

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

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

Wstęp

Elektroseparatoracja odgrywa szczególną rolę np. w procesach odsiarczania i odpopielania węgla [1].

Siła pola elektrycznego (siła elektroforezy) – decydująca o skuteczności procesu – określona wzorem:

$$(1) \quad \vec{F} = q\vec{E} \quad [\text{N}]$$

zależy od wielkości ładunku q i natężenia pola elektrycznego \vec{E} . Pod wpływem tej siły ziarna poruszają się wzdłuż linii sił pola elektrycznego z określoną prędkością. Równocześnie z ruchem wynikającym z działania pola elektrycznego, na ziarna działa wiele innych sił, takich jak: grawitacji, dynamicznego oporu ośrodka, odśrodkowa przy zawirowaniach i zmianach przepływu gazu, i t.p. W procesie elektroseparatoracji dąży się zatem do tego, aby stosunek siły elektrycznej do sił mechanicznych był największy. Poszukuje się sposobów pozwalających na generowanie znacznych wartości ładunków, lub stosuje się znaczne wartości napięcia (ograniczeniem jest wytrzymałość dielektryczna medium). Gwarantuje to spełnienie sformułowanego wyżej warunku.

Proces separacji elektrycznej odbywa się w dwóch etapach: etap pierwszy to selektywna elektryzacja ziaren, etap drugi to ruch strugi w polu elektrycznym separatora, w wyniku czego następuje rozdział ziaren, których ładunki różnią się znakiem lub wartością [2].

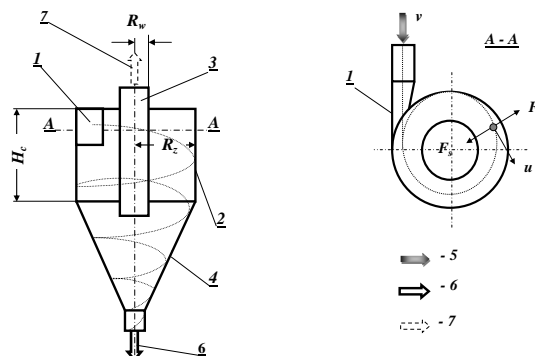
Dla uzyskania pożądanych rezultatów separacji konieczne jest spełnienie warunku selektywnej (różnoimiennej) elektryzacji oraz uzyskanie dużych wartości ładunków ziaren. Do elektryzowania ziaren kopalni wykorzystuje się różnicowanie ich właściwości elektrycznych (np. przewodności elektrycznej, przenikalności dielektrycznej, pracy wyjścia). W literaturze [3] spotyka się opisy kilku sposobów elektryzacji ziaren stosowanych w praktyce: jonizację, indukcję, kontakt i jego odmianę – elektryzację przez tarcie (efekt tryboelektryczny).

W niniejszej pracy poddany zostanie analizie proces elektryzowania ziaren sposobem tryboelektrycznym, polegający na wzajemnym tarcie powierzchni ziaren lub o powierzchnię elektryzatora (np. metalu, półprzewodnika bądź dielektryka). Jest to sposób elektryzowania w wielu przypadkach gwarantujący selektywne ładowanie ziaren i uzyskiwanie przez nie znacznych wartości zwłaszcza w sytuacji, gdy różnice przewodności elektrycznej składników

rozdzielanej mieszaniny są małe (elektryzacja na drodze indukowania ładunków nie daje pożądanych efektów), istnieją natomiast znaczne różnice w pracach wyjścia elektronów kontaktujących się elementów (ziaren i elektryzatora). Od wielkości tej różnicy zależy zarówno znak jak i wielkość nabytego ładunku [4]. Praktyczne rozwiązania urządzeń wykorzystywanych w procesie elektryzowania zakładają intensyfikację tarcia powierzchni ziarna o powierzchnię elektryzatora. Stosuje się więc różne konstrukcje elektryzatorów: wibrujące płyty o regulowanej amplitudzie i częstotliwości, kanały o profilowanych kształtach i inne. Interesująca wydaje się propozycja wykorzystania do elektryzowania ziaren przez tarcie tak specyficznego urządzenia jakim jest cyklon.

Cyklon jako urządzenie elektryzujące

Zastosowanie cyklonu w procesie tryboelektryzacji pozwala na intensyfikację kontaktu ziaren z powierzchnią elektryzatora (np. z metalem ścian, z którego zbudowany jest cyklon). Dokonuje się to dzięki powstaniu siły odśrodkowej występującej przy spiralnym ruchu strumienia gazu unoszącego ziarna mieszaniny. Z zasady działania cyklonu (pokazanej na rys. 1) wynika, że mieszanina ziaren i gazu transportującego wprowadzana jest z prędkością v po stycznej do zewnętrznej ściany cyklonu i wskutek tego porusza się w nim wzdłuż linii spiralnej [5].



Rys. 1. Zasada działania cyklonu

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

Na każde ziarno zawieszona w gazie działa siła wyrażona wzorem:

$$(2) \quad \vec{F}_0 = m \frac{u^2}{r} \vec{a}_r \quad [\text{N}]$$

gdzie: m – masa ziarna, u – prędkość obwodowa ziarna na okręgu o promieniu r , r – promień cyklonu.

Pod wpływem tej siły ziarna są odrzucane na ścianki zewnętrznego cylindra i trąc o nie zsuwają się w kierunku otworu wylotowego (dolna część cyklonu). Gaz pozbawiony pyłu uchodzi w górę do rury wylotowej. Średnią wartość prędkości obwodowej u na promieniu r można wyrazić wzorem:

$$(3) \quad u = \frac{v}{1,7} \frac{r}{R_{sr}} \quad [\text{m/s}]$$

gdzie: v – prędkość wlotowa gazu do cyklonu, R_{sr} – średni promień wejścia $R_{sr} = (R_z + R_w)/2$, $1,7$ – współczynnik uwzględniający zmniejszenie prędkości obwodowej w cylindrycznej przestrzeni cyklonu w porównaniu z prędkością na wejściu [5].

Prędkość obwodowa u może być wyrażona również wzorem:

$$(4) \quad u = 2\pi nr \quad [\text{m/s}]$$

gdzie n – liczba obrotów strugi gazu i ziaren w cyklonie. Porównując wyrażenia (3) i (4) otrzymamy:

$$(5) \quad n = \frac{v}{1,7\pi(R_z + R_w)} \quad [1/\text{s}]$$

Ze wzorów (2), (3) i (5) wynika duża zależność siły docisku ziarna do cyklonu i drogi (wyrażoną liczbą obrotów n w cyklonie), którą ziarno przebywa (wzór (5)) od prędkości wlotowej. Istotną rolę odgrywa również geometria cyklonu, którą można odpowiednio kształtować. Powyższe cechy przemawiają za zastosowaniem cyklonu do elektryzacji ziaren przez tarcie. Dodatkowym udogodnieniem jest stosunkowo prosta regulacja prędkości wlotowej (przez regulację wydatku gazu transportującego). Z tych względów, zastosowano do elektryzowania ziaren cyklon. Materiałem, z którego wykonano cyklon była stal ocynkowana. Materiał ten gwarantuje bowiem - jak wykazały przeprowadzone badania - różnorodną elektryzującą ziaren np. węgla i piritu. Badania przeprowadzone na tym urządzeniu wskazują na słusność wyboru cyklonu jako urządzenia do elektryzowania ziaren przez tarcie.

Analiza rezultatów elektryzowania ziaren w cyklonie

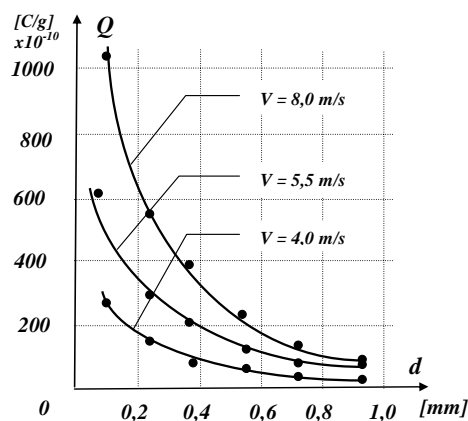
Punktem wyjścia do niniejszych rozważań są uzyskane eksperymentalnie zależności ładunku uzyskiwanego przez tarcie (efekt tryboelektryczny) ziaren węgla i piritu od granulacji ziaren i ich prędkości wlotowej do cyklonu. Zależności te, pokazane na rys. 2a i 2b, uzyskano na urządzeniu opisanym w poprzednim rozdziale. W każdym punkcie charakterystyki wykonano 10 pomiarów.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, ładunek jednostkowy ziaren Q (ładunek 1 grama ziaren) maleje wraz ze wzrostem granulacji (rys. 2a). W jednostce masy ziaren liczba ich jest różna dla różnych klas ziarnowych. Chcąc znaleźć związek między ładunkiem a wielkością ziaren, należy posłużyć gęstością ładunku, tzn. wielkością ładunku przypadającą na jednostkę powierzchni ziaren:

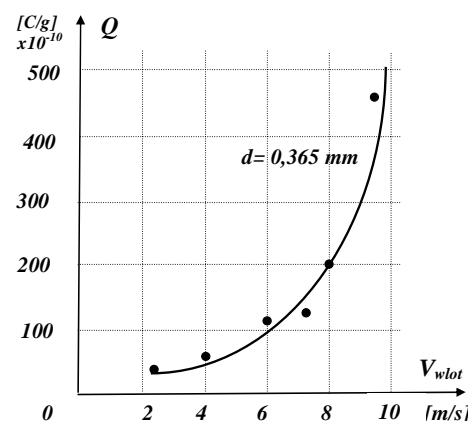
$$(6) \quad \sigma = \frac{Q}{S} \quad [\text{C/m}^2],$$

gdzie Q jest ładunkiem ziarna, S – powierzchnią ziaren.

a)



b)



Rys. 2. Zależność ładunku jednostkowego ziaren węgla Q od ich granulacji d (a) i prędkości wlotowej do cyklonu v_{wlot} (b)

Jak wspomniano, w trakcie prowadzonych badań, został pomierzony ładunek nie pojedynczego ziarna, lecz ich określonej masy (1 grama). Trzeba więc określić wielkość powierzchni jednostkowej masy ziaren. W tym celu autor proponuje posłużyć się pojęciem „powierzchni właściwej” [6], [7]. Jest ona określona następującą zależnością:

$$(7) \quad S_w = \frac{6}{\gamma_m d} \quad [\text{cm}^2/\text{g}],$$

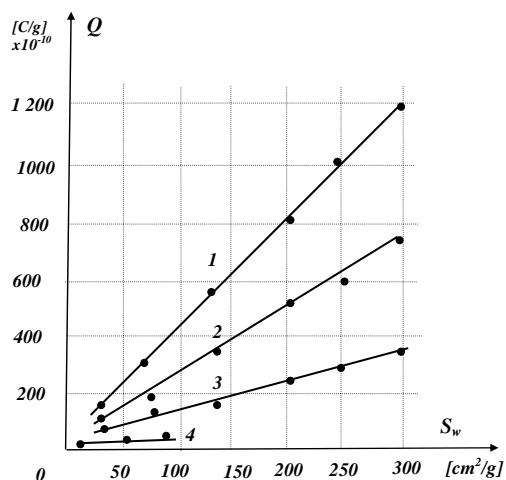
gdzie: γ_m – ciężar właściwy badanego składnika $[\text{g/cm}^3]$, d – średnica ziaren $[\text{cm}]$.

Zależność pomierzonego ładunku jednostkowego ziaren od tak wyznaczonej powierzchni właściwej okazuje się funkcją liniową (rys. 3).

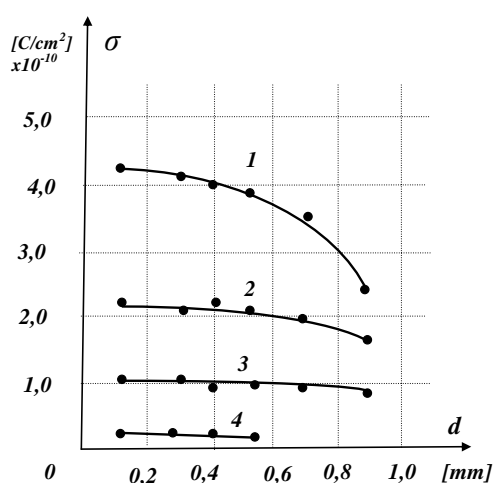
Stosunek ładunku jednostkowego ziaren do ich powierzchni właściwej (współczynnik nachylenia prostych) może być interpretowany jako gęstość powierzchniowa ładunku jednostkowego σ . Jak wynika z rys. 3, gęstość powierzchniowa ładunku powinna być wielkością stałą, charakterystyczną dla danych warunków elektryzacji.

Z wykresów pokazanych na rys. 4 (sporządzonych na bazie uzyskanych rezultatów badań eksperymentalnych) widać jednak, że wielkość ta nie jest stała w całym badanym zakresie granulacji. Jej zmiana związana jest silnie z wielkością ziaren (średnicą d), prędkością wlotową do cyklonu, a także rodzajem badanego składnika.

Interpretacja stwierdzonego eksperymentalnie faktu jest trudna ze względu na wpływ licznych, losowych czynników, a także na ograniczony materiał doświadczalny. Celem wytłumaczenia zjawiska zmniejszania się gęstości powierzchniowej ładunku ze wzrostem granulacji, autor proponuje rozważenie następującej hipotezy:



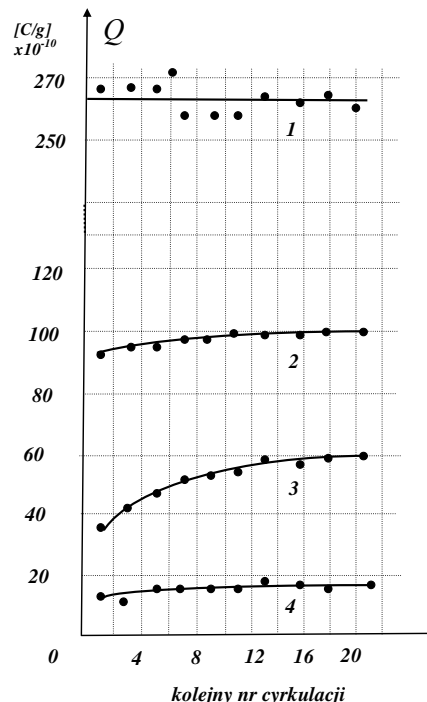
Rys.3. Zależność ładunku jednostkowego ziaren Q od ich powierzchni właściwej S_w
 węgiel: 1 - $v = 8,0$ [m/s]; 2 - $v = 5,5$ [m/s]; 3 - $4,0$ [m/s];
 piryt: 4 - $8,0$ [m/s];



Rys.4. Zależność gęstości powierzchniowej ładunku ziaren σ od ich granulacji d
 węgiel: 1 - $v = 8,0$ [m/s]; 2 - $v = 5,5$ [m/s]; 3 - $4,0$ [m/s];
 piryt: 4 - $8,0$ [m/s]

Wzrost granulacji powoduje prawdopodobnie wzrost niejednorodności ich powierzchni (zmiana mikrostruktury: wypukłości, wgłębienia), co w efekcie ogranicza powierzchnię kontaktu z elektryzatorem. Wynikiem tego jest obserwowana zmiana gęstości powierzchniowej ładunku σ . Dla potwierdzenia powyższej tezy, autor przeprowadził dodatkowe badania. Polegały one na tym, że tę samą odważoną próbkę materiału (węgla) poddano kilkukrotnej elektryzacji w takich samych warunkach, mierząc za każdym razem wygenerowany ładunek. Wyniki doświadczeń prowadzonych dla różnych granulacji pokazano na rys. 5.

Wraz ze wzrostem liczby cyrkulacji ziaren w cyklonie (przepuszczania tej samej próbki przez cyklon) obserwowano dla dużych granulacji ($d = 0,9$ mm) wyraźny wzrost ładunku, który dąży jednak asymptotycznie do określonej wartości ustalonej (krzywa 3 i 4 na rys. 5). Dla ziaren o granulacji średniej ($d = 0,5$ mm) zjawisko zwiększania ładunku zachodzi znacznie wolniej (krzywa 2). Dla drobnych klas ziarnowych wyniki pomiarów oscylują wokół wartości średniej, nie układając się w zależność stwierdzoną dla klas grubszych (krzywa 1).



Rys.5. Zależność ładunku jednostkowego ziaren węgla Q od liczby cyrkulacji w cyklonie;
 1 - $d = 0,25$ mm, $v = 8,0$ m/s; 2 - $d = 0,50$ mm, $v = 8,0$ m/s;
 3 - $d = 0,90$ mm, $v = 8,0$ m/s; 4 - $d = 0,90$ mm, $v = 7,0$ m/s;

Dane uzyskane z tych doświadczeń potwierdzają wcześniej przyjętą hipotezę. Podczas wielokrotnego tarcia tych samych ziaren o powierzchnię elektryzatora (ścianki cyklonu), następuje wyrównanie ich powierzchni poprzez częściowe zmniejszenie nierówności. Zwiększa się zatem efektywna powierzchnia ich kontaktu. Dla mniejszych granulacji ziaren, tarcie o ścianki cyklonu nie jest tak intensywne ze względu na mniejszą siłę docisku (wzór 2), efekt wygładzania powierzchni praktycznie nie zachodzi (rys. 5, linia 1).

Drugim ważnym czynnikiem wpływającym na zmianę gęstości powierzchniowej ładunku ziaren jest ich prędkość wlotowa do cyklonu. Oddzielna analiza wpływu granulacji ziaren i ich prędkości wlotowej na efekt elektryzowania przez tarcie jest praktycznie niemożliwa. Zależności opisujące ruch ziarna w cyklonie (siła docisku, przebyta droga) - wzory (2), (3), (4) - ściśle wiążą te wielkości ze sobą. O tym jak istotny jest wpływ prędkości wlotowej do cyklonu na wielkość uzyskiwanego ładunku, świadczą wykresy pokazane na rysunkach 2b, 4 i 5 (krzywa 3 i 4). Ze wzrostem prędkości wlotowej wzrasta energia ziaren dzięki której realizuje się ich kontakt z powierzchnią elektryzatora. Charakter otrzymanej zależności $Q = f(v)$ świadczy o nieliniowości związku prędkości wlotowej i ładunku ziaren. Przebieg tej funkcji odpowiada zależności siły docisku działającej na ziarno od prędkości wlotowej (wzór 2).

Na podstawie prowadzonych badań eksperymentalnych można także stwierdzić, że duży wpływ na wartość ładunku ziaren ma rodzaj badanego składnika (właściwości elektryczne). Dowodzi tego porównanie zmiany gęstości ładunku dla ziaren węgla i pirytu (rys. 4). Piryt (siarczek żelaza FeS_2), którego przewodność powierzchniowa jest znacznie większa niż przewodność powierzchniowa węgla, nabywa ładunki o mniejszej wartości, lecz spadek gęstości powierzchniowej w zależności od granulacji ziaren zachodzi znacznie wolniej w porównaniu z obserwowanymi zmianami w przypadku węgla.

Ocena wartości uzyskiwanych ładunków

Na zakończenie rozważań dotyczących wpływu różnych czynników na wartość nabytego ładunku, dokonana zostanie ocena gęstości powierzchniowej ładunku pojedynczego ziarna. W tym celu posłużyć się można regułą granicznej gęstości ładunku σ_{max} [6]. Wielkość σ_{max} charakteryzuje stan naelektryzowanego ziarna dielektryka w określonych warunkach zewnętrznych. W przypadku, gdy gęstość ładunku osiąga wartość graniczną, powstające wokół ziarna pole elektryczne przeciwdziała dalszemu przenoszeniu ładunku. Uzyskiwane w praktyce gęstości ładunku są znacznie mniejsze od wartości odpowiadającej nasyceniu, gdyż wielkości te są wynikiem dwóch przeciwstawnych procesów:

1. nabywaniem ładunków na skutek wymiany nośników ładunków pomiędzy elektryzatorem i ziarnem w obszarze ich kontaktu; decydują o tym czynniki wspomniane wyżej, a więc różnica prac wyjścia kontaktujących się kontaktujących się materiałów, wielkość stykających się powierzchni, ich stan, siła docisku ziaren do elektryzatora,
2. utraty nabytych ładunków (rozładowanie ziaren); jest to proces niekorzystny, a wpływają na niego głównie przewodność powierzchniowa ziaren, wyładowania gazowe i inne.

Dla ziarna w kształcie kuli otoczonej powietrzem, gęstość ładunku wynosi:

$$(8) \quad \sigma = \varepsilon_0 E \quad [C/m^2],$$

Przyjmując dla powietrza natężenie pola elektrycznego $E = 3 \cdot 10^6$ [V/m] i $\varepsilon_0 = 8,856 \cdot 10^{-12}$ [F/m] otrzymamy $\sigma_{max} = 2,65 \cdot 10^{-5}$ [C/m²]. Teoretyczny maksymalny ładunek ziarna wyniesie więc:

$$(9) \quad q_{max} = \sigma_{max} S \quad [C],$$

przy czym S jest powierzchnią idealnego ziarna w kształcie kuli.

Dla dwóch przykładowo wybranych granulacji ziaren $d_1 = 0,15$ mm i $d_2 = 0,7$ mm uzyskuje się z zależności (9) odpowiednio $q_{1max} = 1,87 \cdot 10^{-12}$ C, $q_{2max} = 40,5 \cdot 10^{-12}$ C. Porównując rezultaty teoretycznych obliczeń z rezultatami uzyskanymi eksperymentalnie (wartości ładunków dla przyjętych granulacji, dla pojedynczego ziarna wynoszą odpowiednio $q_1 = 0,262 \cdot 10^{-12}$ C i $q_2 = 3,09 \cdot 10^{-12}$ C) można stwierdzić, że ładunek zgromadzony na ziarnie w procesie elektryzowania w cyklonie wynosi odpowiednio ok. 14% i ok. 8% teoretycznego ładunku maksymalnego q_{max} . Jak wynika z danych literaturowych, ładunek ziaren uzyskiwany podczas elektryzacji na wibrujących płaszczyznach wynosi (1 – 1,6) % q_{max} [4]. Porównanie efektów elektryzowania nasuwa jednoznacznie korzystniejsze rozwiązania konstrukcyjne urządzenia do elektryzacji: cyklon, tym bardziej, że przy sprzyjających warunkach (optymalny dobór parametrów), wielkość ładunku ziarna po opuszczeniu cyklonu może osiągnąć wartość nawet 35% q_{max} [4].

Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych rezultatów badań, można sformułować następujące wnioski:

1. Cyklon wykorzystany jako urządzenie do elektryzowania ziaren przez tarcie pozwala uzyskiwać znaczne wartości ładunków przy stosunkowo 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.
2. Wartości ładunków, które uzyskują ziarna są znaczne – w porównaniu z wartościami tychże uzyskiwanymi innymi sposobami (np. na wibrującej płycie).
3. Obok zalet zastosowanie cyklonu w elektroseparatorze wnosi szereg niedogodności i ograniczeń. Istotny jest tu przede wszystkim 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 przez autora w [2]. Cyklon – ze względu na specyfikę pracy – uniemożliwia taki wpływ. Doprowadzenie do równomiernego wypływu ziaren – niezależnie od parametrów wejściowych – musi być przedmiotem rozwiązań konstrukcyjnych wylotu z cyklonu.
4. 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 wąskich klas ziarnowych separowanego materiału.
5. Materiał, z którego powinien być wykonany cyklon powinien gwarantować selektywną (różniamienną) elektryzację ziaren separowanej mieszaniny (o tym decyduje praca wyjścia ziaren ale także materiału o który ocierają się ziarna). Kolejnym wymogiem, który stawia się cyklonowi, to odporność materiału, z którego jest wykonany na ścieranie.

LITERATURA

- [1] Tao Daniel, Fan Mao-ming Jiang Xin-kai: *Dry coal fly ash cleaning using rotor triboelectrostatic separator*, Mining Science and Technology 19 (2009), pp. 642 - 647.
- [2] 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
- [3] Ralston O. C.: *Electrostatic separation of mixed granular solids*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1961.
- [4] 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.
- [5] Mazur M., Teisseyre M.: *Podstawy teorii i konstrukcji urządzeń odpylających*. Wrocław 1977.
- [6] Loeb L.: *Statischelektrische Elektrizität*. Izd. Gosenergoizdat, 1963.
- [7] Simorda J., Staroba J.: *Elektryczność statyczna w przemyśle WNT*, Warszawa, 1970.

Autor: 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.