

Badanie wpływu czynników zakłócających (elektrycznych) na ruch strugi naelektryzowanych ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego

Streszczenie. Dynamika ruchu strugi ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego ma ogromne znaczenie dla prawidłowego przebiegu procesu rozdziału tych ziaren siłami elektroforezy. W pracy przedstawiono rezultaty badań wpływu ładunku przestrzennego utworzonego przez naelektryzowane ziarna na rozkład pola w komorze separatora a także oddziaływania tego ładunku na pojedyncze ziarno.

Abstract. Dynamic of the motion of the stream of particles in the electric field of the deflecting separator has a huge importance for the correct flow of the separation of these particles by the force of electrophoresis. In the paper results of the study on the impact of the volume charge created by the charged particles on the distribution of the field in the chamber of the separator as well as the impact of this charge on a separate particle were presented. **Study of the influence of interfering factors (electric) on the motion of the stream of charged particles in the electric field of deflecting separator**

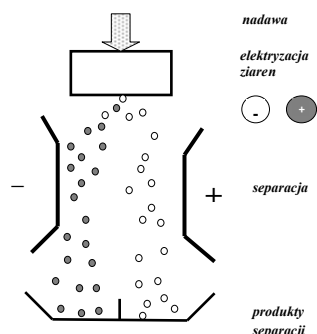
Słowa kluczowe: separacja elektrostatyczna, separator odchylający, rozkład pola elektrycznego, ładunek przestrzenny.

Keywords: electrostatic separation, deflecting separator, distribution of electric field, volume charge

doi:10.12915/pe.2014.12.48

Wstęp

Separacja jest procesem rozdzielania mieszaniny cząstek (ziaren) o różnych właściwościach fizycznych. W przypadku separacji elektrycznej, w której wykorzystuje się dynamiczne działanie pola elektrycznego, właściwościami tymi są: przenikalność dielektryczna, konduktywność, praca wyjścia, właściwości powierzchniowe. 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 (rys. 1).



Rys. 1. Zasada działania elektrostatycznego separatora odchylającego

Przedmiotem rozważań niniejszej pracy jest drugi etap procesu separacji, tzn. rozdział strugi ziaren w komorze separatora. Ruch naelektryzowanych ziaren w polu elektrycznym separatora jest zdeterminowany działaniem sił elektrycznych i mechanicznych. Siła pola elektrycznego (siła elektroforezy) – decydująca o skuteczności procesu separacji – określona wzorem:

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

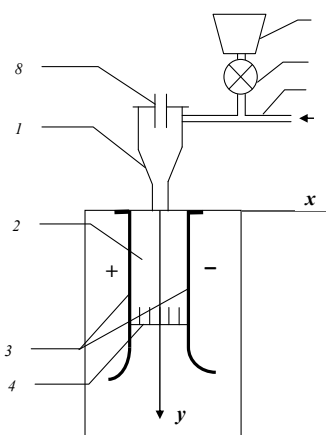
zależy od wielkości ładunku q i natężenia pola elektrycznego \vec{E} . Pod wpływem tej siły ziarna poruszają się wzdłuż linii sił pola elektrycznego z określoną prędkością. Równocześnie z ruchem wynikającym z działania pola elektrycznego, na ziarna działa wiele innych sił, takich jak: grawitacji, dynamicznego oporu ośrodka, odśrodkowa przy zawirowaniach i zmianach przepływu gazu, itp.

Modelowanie ruchu ziaren w komorze separatora jest podstawą do jego prawidłowej konstrukcji i eksploatacji. Określenie parametrów mających wpływ na proces separacji w rzeczywistych warunkach jest trudne ze względu na wpływ szeregu czynników, które są zależnościami złożonymi. Konieczne staje się przeprowadzenie badań teoretycznych, jak i eksperymentalnych, które weryfikują poczynione założenia teoretyczne.

Celem prezentowanych w niniejszym artykule rozważań jest ocena wpływu ładunku przestrzennego utworzonego przez naelektryzowane ziarna na rozkład pola w komorze separatora a także oddziaływania tego ładunku na pojedyncze ziarno. Oba zjawiska mogą wpływać na trajektorię ziaren.

Stanowisko badawcze

Badania nad zachowaniem się strugi naelektryzowanych ziaren w komorze separatora były prowadzone na stanowisku badawczym pokazanym na rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko do badań ruchu strugi ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego:

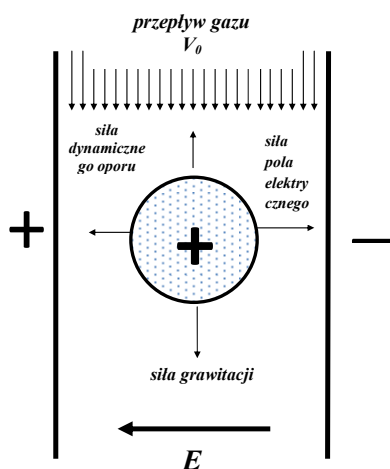
1 – elektryzator (cyklon), 2 – komora separatora (obszar pola elektrycznego), 3 – elektrody płasko – równoległe, 4 – odbieralnik, 5 – zbiornik ziaren, 6 – podajnik, 7 – przewód transportujący, 8 – wylot powietrza z cyklonu

Ziarna badanego materiału transportowane są do cyklonu, gdzie trąc o jego ścianki elektryzują się. Cyklon spełnia zatem rolę elektryzatora ziaren. Naelektryzowane ziarna opadają z cyklonu na obszar pola elektrycznego

utworzonego przez dwie elektrody płasko-równoległe. Między elektrodami zamocowany jest odbieralnik, którego położenie (odległość względem wylotu z cyklonu) jest regulowane. Szerokość odbieralnika wynosi 0,175 m (szerokość każdej z siedmiu przegród odbieralnika – 0,025 m). Odchylona siłą elektroforezy struga ziaren dostaje się do przegród odbieralnika. Na opisanym urządzeniu zbadano wpływ czynników na ruch strugi ziaren: prędkości wlotowej do cyklonu (elektryzatora), granulacji ziaren, natężenia pola elektrycznego i wysokości elektrod. Rezultaty tych badań były prezentowane w [1].

Ruch naelektryzowanych ziaren w polu separatora odchylającego

Analizując ruch naelektryzowanych ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego (rys. 3), należy w pierwszej kolejności stworzyć model matematyczny. Jest to zadanie złożone ze względu na wpływ wielu czynników powiązanych niejednokrotnie złożonymi zależnościami.



Rys. 3. Naelektryzowane (dodatnio) ziarno w polu elektrycznym separatora odchylającego

Przy tworzeniu modeli matematycznych ruchu naelektryzowanych ziaren w polu elektrycznym przyjmuje się szereg uproszczeń, pomijając wiele mechanizmów, przyjmując adekwatność tych modeli, które są najbardziej zgodne z wynikami badań eksperymentalnych.

W ogólnym przypadku, ruch naelektryzowanych ziaren opisuje się równaniem wektorowym w postaci:

$$(2) \quad m \frac{d\vec{w}}{dt} = \sum \vec{F}$$

gdzie: m - masa ziarna, $\frac{d\vec{w}}{dt}$ - przyspieszenie ziarna, $\sum \vec{F}$ - suma wszystkich działających na ziarno sił.

Biorąc pod uwagę najważniejsze siły występujące w procesie separacji, można napisać, że:

$$(3) \quad \sum \vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_g + \vec{F}_s,$$

gdzie odpowiednio: $\vec{F}_E, \vec{F}_g, \vec{F}_s$ - siła elektroforezy określona wzorem (1), grawitacji i dynamicznego oporu ośrodka.

W konsekwencji takich założeń, uwzględniając stosowne zapisy określające wymienione siły, otrzymuje się równania ruchu naelektryzowanego ziarna w polu elektrycznym separatora względem przyjętego układu współrzędnych [2]:

$$(4) \quad \frac{d^2\bar{x}}{dt^2} = \bar{E}_E \frac{q}{m} - 6\pi \frac{\eta}{m} r \frac{d\bar{x}}{dt},$$

$$(5) \quad \frac{d^2\bar{y}}{dt^2} = 6\pi \frac{\eta}{m} r \frac{d\bar{y}}{dt} + \bar{g}.$$

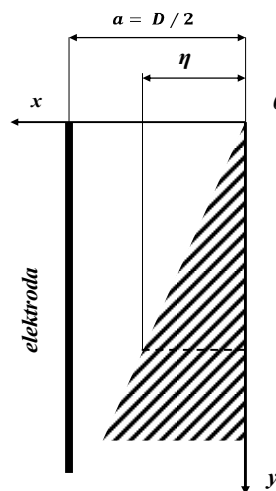
Opisaną sytuację przedstawiono na rys. 3, na którym pokazano pojedyncze ziarno (naelektryzowane dodatnim ładunkiem) umieszczone w komorze separatora odchylającego.

Przy rozwiązywaniu równań (4) i (5) przyjmuje się najczęściej zerowe warunki początkowe. Jednak ziarna rozdzielanej mieszaniny opadają w obszar działania pola elektrycznego z elektryzatora o określonej konstrukcji (np. wibrująca płyta, cyklon). Zatem konstrukcja elektryzatora wprowadza już pewną implikację do otrzymanego rozwiązania ww. równań.

Przedstawiony model opisuje ruch pojedynczego ziarna. Jest to zatem model mikroskopowy. W warunkach rzeczywistych w komorze separatora znajduje się skończona liczba naelektryzowanych ziaren. Tworzą one ładunek przestrzenny, który wpływa na rozkład pola elektrycznego w przestrzeni rozdzielacza separatora, a także oddziałuje na ziarna strugi. Niniejszy artykuł poświęcony będzie analizie tych dwóch kwestii.

Rozkład pola elektrycznego w komorze separatorze z uwzględnieniem ładunku przestrzennego

Rozkład pola elektrycznego w przestrzeni separatora jest istotnym parametrem procesu separacji i zależy głównie od geometrii elektrod. W przypadku separatora odchylającego układ taki jest utworzony przez elektrody płasko-równoległe, zatem - z definicji - rozkład pola jest jednostajny. Czynnikiem, który może zakłócić jednostajność rozkładu pola jest obecność ładunku przestrzennego w komorze separatora. Tworzą go naelektryzowane ziarna (różnych znaków i wartości) znajdujące się w tej komorze. Wartość tego ładunku, a zatem i wpływ na rozkład zewnętrznego pola zależna jest od liczby ziaren w jednostce objętości (stężenia ziaren – wydajności separatora) i ładunku pojedynczych ziaren.



Rys. 4. Ruch strugi w separatorze odchylającym

Dokonana zostanie ocena wpływu wielkości ładunku objętościowego na rozkład pola elektrycznego w komorze separatora odchylającego. W opisywanym urządzeniu, naelektryzowane ziarna opuszczające elektryzator, poruszają się dwoma rozchodzącymi się strugami odpowiadającymi ziarnom naelektryzowanym różniemiennie (rys.1). W takim przypadku, na różnej wysokości, ładunek przestrzenny wypełnia różną objętość, wobec czego przestrzenna gęstość ładunku jest funkcją wysokości komory rozdzielacza. Proponuje się zatem następujący tok rozumowania [3]: elektrody separatora tworzą kondensator

plaski, odległość między elektrodami wynosi D . Lewą połowę kondensatora ($a = D/2$) wypełnia dodatni ładunek przestrzenny, o gęstości ρ w przedziale ($0 \leq x \leq \eta$), dla ($x > \eta$) $\rho = 0$ (brak naelektryzowanych ziaren) (rys. 4). Prawą część kondensatora zajmuje podobnie ładunek ujemny. W przedziale ($x \leq \eta$) pole elektryczne opisane jest równaniem Poissona:

$$(6) \quad \frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon},$$

w przedziale ($x > \eta$), równaniem Laplace'a:

$$(7) \quad \frac{d^2 \varphi}{dx^2} = 0.$$

Rozwiązania równań (6) i (7), dla zerowych warunków początkowych (dla $x = 0$, $\rho = 0$), przyjmują następującą postać:

dla ($x \leq \eta$):

$$(8) \quad E = \frac{U}{2a} + \frac{\rho}{\varepsilon} x - \frac{\rho}{\varepsilon} \eta + \frac{\rho}{2\varepsilon} \frac{\eta^2}{a}$$

dla ($x > \eta$):

$$(9) \quad E = \frac{U}{2a} + \frac{\rho}{2\varepsilon} \frac{\eta^2}{a}.$$

Wpływ ładunku przestrzennego można pominąć, jeżeli spełniony jest warunek $E_0 \gg E_1$, w którym:

$$(10) \quad E_0 = \frac{U}{2a} \quad \text{- natężenie zewnętrznego pola elektrycznego przy braku ładunku przestrzennego,}$$

$$(11) \quad E_1 = \frac{\rho}{2\varepsilon} \frac{\eta^2}{a} \quad \text{dla } (x > \eta),$$

$$(12) \quad E_1 = \frac{\rho}{\varepsilon} x - \frac{\rho}{\varepsilon} \eta + \frac{\rho}{2\varepsilon} \frac{\eta^2}{a} \quad \text{dla } (x \leq \eta)$$

- wyrażenia określające natężenie pola elektrycznego pochodzące od ładunku przestrzennego.

Zakładając, że całkowity ładunek znajdujący się w przestrzeni międzyelektrodowej separatora przy jego równomiernym rozkładzie pozostaje stały, otrzymamy:

$$(13) \quad \rho \cdot \eta = \rho_0 \cdot a$$

gdzie: ρ_0 - gęstość ładunku w przypadku jego równomiernego rozkładu w przestrzeni międzyelektrodowej. Przekształcając dalej wyrażenie (12) przez podstawienie (13), otrzymujemy:

$$(14) \quad E_1 = \frac{\rho_0}{\varepsilon} x - \frac{\rho_0}{\varepsilon} \left(a - \frac{\eta}{2} \right)$$

Z wyrażenia (14) wynika, że E_1 dla $\eta = const.$ osiąga maksimum przy $x = \eta$ lub $x = 0$.

Dla $x = \eta$, ze wzoru (14) otrzymujemy:

$$(15) \quad E_1 = \frac{\rho_0 \eta}{2\varepsilon},$$

natomiast dla $x = 0$:

$$(16) \quad E_1 = -\frac{\rho_0}{\varepsilon} \left(a - \frac{\eta}{2} \right).$$

Jeżeli zawsze zachodzi: $\eta \leq a$, to z zależności (16) wynika, że dla $\eta = 0$ E_1 przyjmuje maksymalną wartość:

$$(17) \quad E_{1\max} = -\frac{\rho_0}{\varepsilon} a$$

Porównując zależności (10) i (17), otrzymamy ostatecznie kryterium zakłócenia rozkładu pola elektrycz-

nego przez ładunek przestrzenny naelektryzowanych ziaren w przestrzeni roboczej separatora:

$$(18) \quad K = \frac{2\rho_0 a^2}{\varepsilon \cdot U} \ll 1.$$

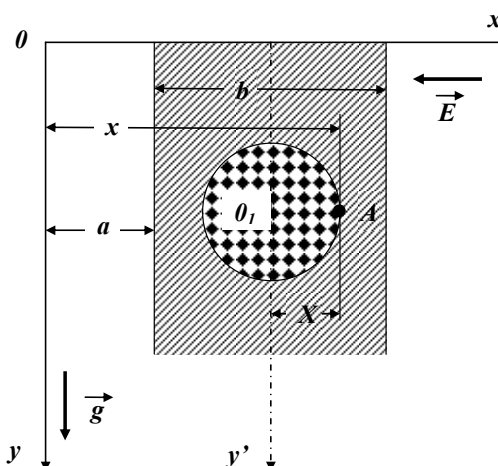
Dla przykładowych warunków separacji istniejących w separatorze odchyłającym pokazanym na rys. 2 (tzn. dla $a = 0,09$ [m], $E = 3 \cdot 10^5$ [V/m], $U = 5,4 \cdot 10^4$ [V], stężenie ziaren w zawieszynie $Z_0 = 200$ [g/m³], $\rho_0 = 1,7 \cdot 10^{-6}$ C/m³), dla granulacji ziaren w zakresie (0,43 – 0,3) mm), otrzymamy:

$$K = \frac{2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot (9 \cdot 10^{-2})^2}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5,4 \cdot 10^4} = 0,058$$

Ponieważ $K \ll 1$, można więc pominąć wpływ oddziaływania ładunku przestrzennego cząstek i przyjąć, że pole w całej przestrzeni separatora odchyłającego jest jednostajne.

Wzajemne oddziaływanie naelektryzowanych ziaren

Na rys. 4 przedstawiono pionowy przekrój strugi ziaren, przy braku rozproszenia i odchylenia ($E = 0$ kV/cm).



Rys. 4. Pionowy przekrój strugi ziaren w separatorze odchyłającym

Rozpatrzone zostanie zachowanie pojedynczego ziarna o średnicy d i ładunku q znajdującego się w punkcie A , przy założeniu, że ładunek jest równomiernie rozłożony w objętości zajmowanej przez strugę oraz źródłem pola elektrycznego w danym punkcie jest wyłącznie ładunek zgromadzony na ziarnie znajdującym się w tym punkcie. Przy oznaczeniu odległości od punktu A do osi y' przez X , współrzędna tego punktu na osi x będzie wyrażona równaniem:

$$(19) \quad x = X + a + \frac{b}{2}.$$

Oznaczenia w wyrażeniu (19) odpowiadają oznaczeniom na rys. 4. Natężenie pola pochodzące od ładunku przestrzennego zawartego w objętości kuli o promieniu X w punkcie A jest określone zależnością:

$$(20) \quad E_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{4}{3} \pi \rho X = \frac{\rho X}{3\varepsilon_0},$$

gdzie: ρ jest gęstością ładunku przestrzennego:

$$(21) \quad \rho = q_{sr} \cdot n,$$

q_{sr} - średnia wartość ładunku ziaren, n - liczba ziaren w rozpatrywanej objętości.

Podstawiając (20) do (19) otrzymuje się:

$$(22) \quad E_p = \frac{nq_{sr} X}{3\varepsilon_0}.$$

Przy ruchu strugi w kierunku osi y współrzędna x punktu A również ulega zmianie przyjmując większe wartości. Zmienia się także stężenie (koncentracja) ziaren. Jednakże liczba ziaren w obszarze strugi o wymiarach $2X$ pozostaje stała. Może to być wyrażone w postaci zależności [3]:

$$(23) \quad 2X^3\sqrt{n} = C = const ,$$

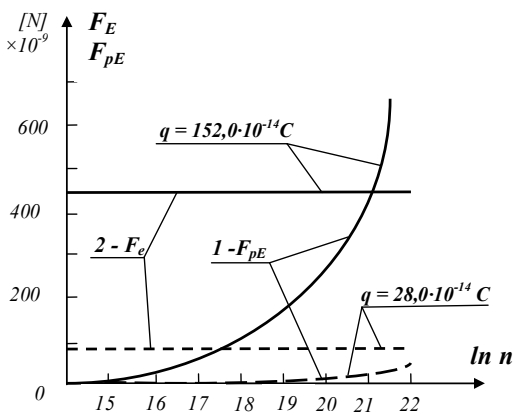
lub po przekształceniu:

$$(24) \quad n = \frac{C^3}{8X^3} .$$

Z uwzględnieniem wzorów (22) i (23) oraz (19) wyrażenie określające wielkość siły wzajemnego oddziaływania naelektryzowanych ziaren F_{pE} przybierze ostatecznie postać:

$$(25) \quad F_{pE} = E_p q = \frac{C^3 q_{sr} q}{24} \frac{1}{\left(x - a - \frac{b}{2}\right)^2} .$$

Dysponując koniecznymi wielkościami (ładunek ziaren, stężenie w komorze separatora, wymiary komory), można ocenić za pomocą wzoru (25) wpływ jednego z czynników na rozproszenie ziaren (elektrostatycznego oddziaływania ziaren).



Rys. 5. Zmiana siły oddziaływania wzajemnego ziaren F_{pE} w zależności od ich koncentracji n w komorze rozdzielacza separatora odchylającego

Podobnie jak w poprzednim rozdziale, przeprowadzono obliczenia F_{pE} dla warunków panujących w komorze rozdzielacza separatora (rys. 2). Obliczenia wykonano dla ziaren o granulacji (0,3 - 0,43) mm, dla $a = 0,07$ m, $b = 0,04$ m i dwóch wartości ładunków uzyskanych w procesie elektryzacji: $q = q_{sr} = 28 \cdot 10^{-14}$ [C] oraz $q = q_{sr} = 152 \cdot 10^{-14}$ [C]. Wyniki obliczeń dla kilku wydajności separatora zaprezentowano na rys. 5. Przedstawia on zależność siły wzajemnego oddziaływania ziaren F_{pE} dla ustalonego położenia w separatorze ($x = 0,11$ m) (jest to początkowy punkt rozproszenia strugi naelektryzowanych ziaren), od koncentracji ziaren n w komorze separatora (krzywa 1). Dla porównania naniesiono również na wykres wielkości siły elektroforezy F_E obliczone dla obu wartości ładunków przy założonej wartości natężenia zewnętrznego pola elektrycznego $E = 3,0$ kV/cm (linia 2). Jak wynika z

porównania krzywych 1 i 2, przy znacznych koncentracjach naelektryzowanych ziaren (wydajności separatora), wielkość siły F_{pE} może osiągnąć wartość porównywalną z wartością siły F_E .

Przyjęte do obliczeń wydajności urządzenia przy założonej objętości komory rozdzielacza (około $0,04$ m³) są duże. W powyższym przykładzie stężenie ziaren w gazie transportującym Z_0 na wlocie do urządzenia elektryzującego - cyklonu - nie przekraczało ok. 200 g/m³, co odpowiada koncentracji ziaren w komorze rozdzielacza ok. $6 \cdot 10^6$ 1/m³. Dla tych wartości koncentracji ziaren, siły wzajemnego oddziaływania są do pominięcia w porównaniu z siłą elektroforezy. Tak więc rozproszenie ziaren w separatorze odchylającym spowodowane czynnikami elektrycznymi jest niewielkie i może być pominięte. Jak wynika z przeprowadzonej teoretycznej analizy, wzajemne zderzenia naelektryzowanych ziaren nie zakłócają procesu separacji w znacznym przedziale wydajności separatora.

Zatem - na podstawie obserwacji pracy urządzenia - można stwierdzić, że decydującą rolę w zakłóceniu ruchu strugi ziaren w komorze rozdzielacza separatora odgrywają czynniki mechaniczne. Zostały one przeanalizowane w [1].

Podsumowanie

Na podstawie analizy zjawisk natury elektrycznej zachodzących w komorze separatora odchylającego nasuwają się następujące wnioski:

1. Ruch naelektryzowanych ziaren w komorze rozdzielacza separatora jest zdeterminowany wieloma czynnikami. Istotne są czynniki natury mechanicznej (rozproszenie strugi). Uzyskanie równomiernego wypływu strugi ziaren z cyklonu - niezależnie od parametrów wejściowych (prędkości wlotowej) musi być przedmiotem optymalizacji konstrukcji mechanicznej.
2. Elementem konstrukcyjnym, na którego rozwiązanie należy zwrócić szczególną uwagę, są wymiary i kształt elektrod.
3. Z przeprowadzonych przez autora badań wynika, że dla badanych warunków separacji (głównie koncentracji ziaren w komorze separatora) czynniki natury elektrycznej: rozkład natężenia pola w komorze i wzajemne oddziaływanie naelektryzowanych ziaren są do pominięcia przy analizie zjawisk zakłócających trajektorię ziaren.

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] Kałganow A. F., Caturian A. I.: *K woprosu o dwiżenii puczka zariażennych czastic w popieriecznom elektriczieskom pole*. Sbornik: "Silnyje elektriczieskiye pola w technologiczeskich processach". Izd. Energia, Moskwa 1969.

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.