

Elektryzacja rozproszonych kropli aerozoli cieczy przewodzących

Streszczenie. W pracy przedstawiono proces elektryzacji kropli aerozoli wytworzonych przez głowicę z naddźwiękowym przepływem gazu. W celu uniknięcia tzw. „efektu ekranowania” występującego podczas elektryzacji indukcyjnej, zaproponowano elektryzację rozproszonych kropli aerozoli. Uzyskane wyniki wskazują silną zależność parametru Q/m od wydatku wody oraz na złożoność procesu elektryzacji rozproszonych kropli aerozoli.

Abstract. The process of electrification of aerosol particles dispersed by a pneumatic sprayer with supersonic air flow is presented in this paper. To avoid the shielding effect in induction charging of aerosol, the droplets electrification process following the dispersion of liquid was proposed. Results have shown, that the Q/m factor values power type dependence of the liquid feed rate and the droplets electrification following the dispersion was a complex process. (**Electrization of aerosols dispersed droplets of conductive liquids**).

Słowa kluczowe: aerozol, elektryzacja indukcyjna, elektryzacja przewodnościowa, ładunek przestrzenny

Keywords: conduction charging, induction charging, aerosol, space charge

doi:10.12915/pe.2014.10.37

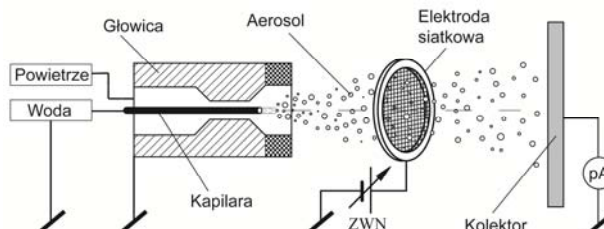
Wstęp

Dotychczas wykonane badania elektryzacji kropli aerozolu, wytwarzanego za pomocą głowic pneumatycznych z naddźwiękowym przepływem gazu, wykazały, że zastosowanie metody indukcyjnej pozwala na uzyskanie wartości parametru Q/m na poziomie 0,1 - 2,3 mC/kg [1]. W czasie tych badań stwierdzono, że wartość Q/m jest ściśle związana nie tylko z budową układu elektrod, ale również z warunkami zasilania głowicy (wydatku wody, ciśnienia sprężonego powietrza). Otrzymane wartości parametru Q/m przy maksymalnym natężeniu pola elektrycznego są niższe niż wynikałoby ze znanych praw (limit Rayleigh'a, wytrzymałość elektryczna powietrza, maxwellowa stała czasu) [2]. Jednym z powodów niskiej wartości parametru Q/m może być efekt ekranowania, odpowiedzialny za kompensację pola elektrycznego wytworzonego przez elektrodę indukcyjną [3, 4].

Aby uniknąć efektu ekranowania zaproponowano elektryzację rozproszonych kropli aerozolu. Jedną z metod elektryzacji kropli aerozoli jest ich transport w obszarze wyładowań koronowych [5]. Metoda ta jednak wymaga relatywnie długiego czasu przebywania kropli w rozległej przestrzeni z silnym polem elektrycznym. W pracy zastosowano metodę przewodnościową [6] polegającą na elektryzacji kropli poprzez ich kontakt z elektrodą siatkową.

Przewodnościowa metoda elektryzacji

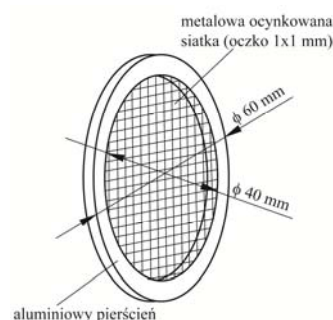
Szkic ilustrujący zasadę elektryzacji kropli metodą przewodnościową oraz opisujący stosowane stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Szkic ilustrujący układ do elektryzacji kropli aerozoli metodą przewodnościową; ZWN – zasilacz wysokiego napięcia stałego

Krople aerozolu, cieczy rozpraszanej pneumatycznie w głowicy, przechodzą przez elektrodę siatkową przedstawioną na rysunku 2, z którą może występować ich przejściowy kontakt. W czasie kontaktu, występującym w

obecności silnego pola elektrycznego następuje elektryzacja kropli będących w kontakcie z elektrodą siatkową [7].



Rys.2. Szkic wysokonapięciowej elektrody siatkowej

W układzie doświadczalnym do wytworzenia naładowanych cząstek aerozolu zastosowano głowicę EFEN 110,05 TELESTO®, z elektrodą siatkową (szerokość oczka 1 mm, grubość drutu 0,2 mm). Elektroda była umieszczona w odległości $l = 30 - 80$ mm od czoła głowicy, prostopadle do osi strumienia cząstek rozproszonej cieczy. Elektrodę zasilano za pomocą regulowanego stabilizowanego zasilacza wysokiego napięcia stałego typu Glassman (+)0-50kV. Dla pomiaru parametru Q/m strumień naelektryzowanych cząstek był kierowany na odizolowany od ziemi system elektrod zbiorczych. System zawierał 3 metalowe elektrody o wymiarach 1,30x1,30 m, wyposażone w siatkowe łumiki o wymiarach 1,00x1,00 m. Do pomiaru prądu kolektora I_c (prądu chmury) zastosowano analogowy pikoamperomierz PA100. Wartość prądu zasilania I_z została odczytywana z wbudowanego do zasilacza miernika prądu.

Wartość parametru Q/m wyznaczano na podstawie zależności:

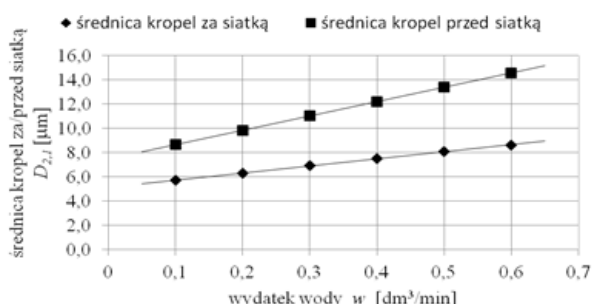
$$(1) \quad (Q/m) = \frac{I_c t_k}{V_k \gamma}$$

gdzie: I_c – maksymalna ustalona wartość prądu chmury dla określonych warunków elektryzacji oraz przepływu mediów (wody i powietrza), γ – gęstość medium rozpraszającego (wody), V_k – objętość rozpraszanej cieczy, zebranej na kolektorze w czasie t_k .

Kontakt rozproszonych kropeł z elektrodą siatkową

Istotną cechą elektrody siatkowej jest jej „transparentność” dla przechodzącego przez nią strumienia rozproszonych cząstek aerozolu. Przy użyciu głowic z naddźwiękowym przepływem gazu, strumień rozproszonych cząstek ma na tyle dużą prędkość, że siatka nie stanowi widocznej przeszkody. Eksperymentalnie potwierdzono, że przy utrzymaniu standardowych warunków zasilania głowicy rozpraszającej, liczba zebranych kropeł i ilość cieczy spływającej z elektrody siatkowej jest do zaniedbania.

Zjawiskiem występującym podczas kontaktu kropeł z elektrodą siatkową jest proces koalescencji lub rozpadu kropeł [8]. Proces ten prowadzi do wzrostu lub spadku średnicy kropeł i w konsekwencji może wpływać na wartość parametru Q/m , podobnie jak efekt ekranowania bądź inne efekty ograniczające. Wpływ kontaktu kropeł z elektrodą na ich średnicę został przedstawiony na wykresie zawartym na rysunku 3.



Rys.3. Zależność średniej średnicy kropeł D_2 za siatką i średniej średnicy kropeł D_1 przed siatką od wydatku wody w . Dla prędkości cząstek aerozolu $v = 160$ m/s = const (odległość głowica – elektroda siatkowa $l = 30$ mm)

Jak wynika z wykresu przedstawionego na rysunku 3 wartość średniej średnicy kropeł po kontakcie z elektrodą siatkową zmienia się w nieznaczny sposób i nie może wpłynąć w znaczący sposób na wartość parametru Q/m .

Prawdopodobieństwo kontaktu kropli z elektrodą siatkową o kształcie i wymiarach przedstawionych na rysunku 2, jest na poziomie 30%, to znaczy, że tylko 30% kropeł ulega elektryzacji po przez kontakt z elektrodą siatkową.

Model elektryzacji rozproszonych kropeł aerozoli

Elektryzacja rozproszonych kropeł aerozolu za pomocą elektrody siatkowej jest procesem złożonym. Wszystkie krople opuszczające kapilarę (dyszę) ulegają elektryzacji indukcyjnej w trakcie atomizacji cieczy w polu elektrycznym występującym w obszarze dysza – elektroda siatkowa. Należy podkreślić efekt wzrostu natężenia pola elektrycznego w otoczeniu dyszy, w stosunku do pola średniego w tym obszarze (efekt zbliżony do występowania w układzie ostrze – płyta). Efektem elektryzacji indukcyjnej jest początkowy ładunek cząstek aerozolu, którego wartość zależy od napięcia zasilania elektrody siatkowej U_p oraz od odległości kapilary (głowicy) od elektrody siatkowej. Podczas elektryzacji indukcyjnej wartość parametru Q/m cząstek opuszczających przestrzeń głowica – elektroda siatkowa, uwarunkowana jest również parametrami zasilania głowicy na skutek występowania efektu ekranowania.

Podczas przepływu strumienia cząstek aerozolu przez powierzchnię elektrody siatkowej, część cząstek wchodzi w kontakt z elektrodą i zmienia wartość jak i znak ładunku. Pozostała część kropeł aerozolu przechodzi przez obszar elektrody siatkowej bez zmiany ładunku (znaku i wartości). Chmura naelektryzowanych cząstek aerozolu za elektrodą siatkową posiada zatem ładunek bipolarny. Bezwzględna

wartość ładunku zgromadzonego w chmurze aerozolu jest równa sumie ładunku wytworzonego podczas elektryzacji indukcyjnej oraz przewodnościowej.

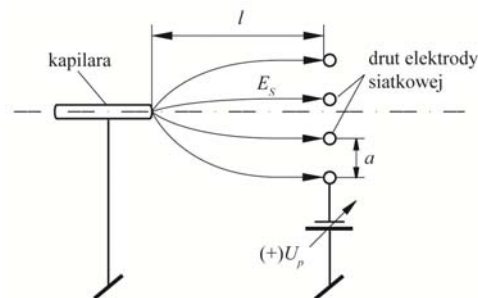
Przy elektryzacji przewodnościowej, dotyczącej kropeł kontaktujących się z elektrodą siatkową, zasadniczy wpływ na wartość ładunku cząstki ma wartość pola elektrycznego występującego w miejscu kontaktu kropli z siatką. Lokalną wartość składowej normalnej natężenia pola E_{max} w otoczeniu drutu tworzącego siatkę można wyznaczyć z zależności:

$$(2) \quad E_{max} = E_s + E_0$$

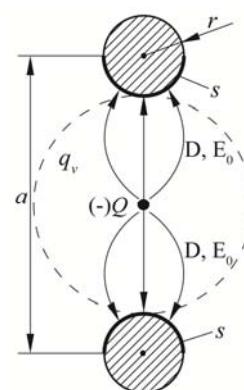
gdzie: E_s jest składową normalną do powierzchni drutu wynikającą z tworzonoego w obszarze dysza głowicy – elektroda siatkowa (zasilanie elektrody siatkowej napięciem U_p) – przedstawioną na rysunku 4; E_0 – jest składową normalną przy powierzchni drutu siatki tworzonej przez ładunek przestrzenny znajdujący się w obszarze oczka siatki – przedstawioną na rysunku 5. Ładunek ten jest niesiony przez strumień naładowanych indukcyjnie cząstek aerozolu przepływających przez obszar siatki. Wartość składowej pola E_0 jest wprost proporcjonalna do wartości ładunku przestrzennego strumienia kropeł aerozolu zgodnie z zależnością:

$$(3) \quad E_0 = A \cdot q_v$$

gdzie: A – jest stałą, określoną przez geometrię oczka elektrody siatkowej.



Rys.4. Szkic przekroju poprzecznego elektrody siatkowej oraz linii sił składowej pola E_s

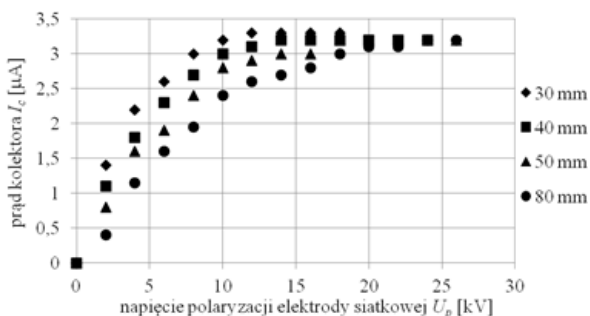


Rys.5. Oczko elektrody siatkowej. Wpływ ładunku przestrzennego na wartość lokalnego pola E_0

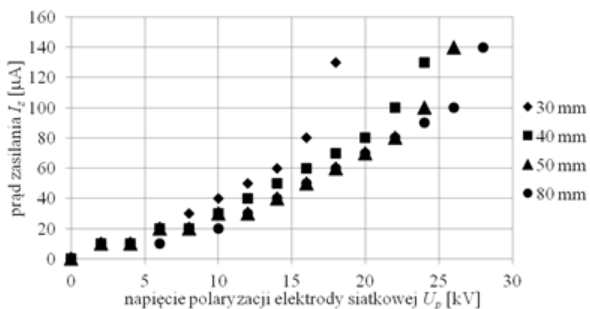
Wyniki badań

Pomiary skuteczności elektryzacji wykonano dla głowicy EFEN 110,05 z naddźwiękowym przepływem gazu zasilanej powietrzem i wodą. Standardowe warunki zasilania głowicy mediami: ciśnienie powietrza $p_p = 4$ bar, wydatek powietrza $w_p = 0,5$ m³/min, ciśnienie wody $w_w = 0,5$ l/min, wydatek wody $w_w = 0,5$ dm³/min.

Medium rozpraszającym była woda wodociągowa o konduktywności na poziomie 0,50 mS/cm. Głowica rozpylająca położona była w odległości $L = 2,0$ metrów od elektrod kolektora. Pomiar wykonano w warunkach: temperatura powietrza $t = 23^{\circ}\text{C}$, wilgotność względna powietrza $RH = 70\%$. Wyniki pomiarów zależności prądu kolektora I_c oraz prądu zasilania I_z od napięcia polaryzującego elektrodę siatkową U_p przedstawiono na rysunku 6 i rysunku 7. Pomiar wykonano przy sprawności wychwytu cząstek aerozolu przez kolektor na poziomie $\eta = 60\%$.



Rys.6. Zależność prądu kolektora I_c od napięcia polaryzacji U_p . Standardowe warunki zasilania głowicy mediami



Rys.7. Zależność prądu zasilania I_z od napięcia polaryzacji U_p . Standardowe warunki zasilania głowicy mediami

Pomiar prądu zasilania jak i kolektora dały wyniki analogiczne do otrzymanych przy elektryzacji aerozolu metodą indukcyjną. Zaobserwowano nasycenie prądu kolektora, występujące powyżej określonej wartości napięcia polaryzacji elektrody, które w jednoznaczny sposób koreluje z silnym zwiększeniem się wartości prądu zasilania. Wspomnianą korelację zaobserwowano dla każdej odległości l pomiędzy elektrodą siatkową a czołem głowicy. Odległość tę zmieniano w zakresie $30 < l < 80$ mm. Stwierdzono, że dla odległości $l = 80$ mm strumień aerozolu w całości pokrywa powierzchnię elektrody siatkowej. Wartość prądu kolektora I_c w warunkach nasycenia jest na poziomie $3,2 - 3,3 \mu\text{A}$ i określa maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego E_m w miejscu kontaktu kropli z elektrodą siatkową. Nasycenie prądu kolektora obserwuje się dla różnych wartości napięć polaryzacji U_p . Wartość ta zmienia się dla $l = 30 - 80$ mm w zakresie od (+)12 do (+)24 kV.

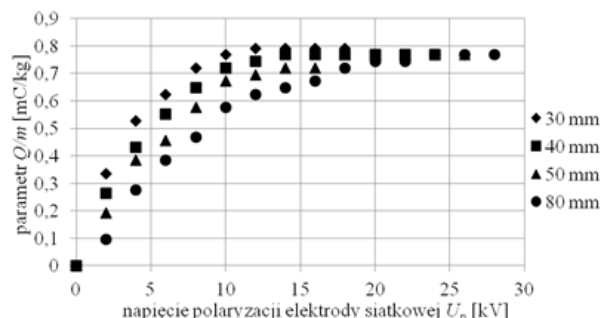
Na podstawie zmierzonych doświadczalnie wartości prądu kolektora I_c wyznaczono przebieg parametru Q/m od napięcia polaryzacji elektrody siatkowej U_p . Przebieg ten przedstawiono na rysunku 8.

Wpływ średniej wartości natężenia pola elektrycznego E_{sr} na efektywność elektryzacji dla różnych odległości elektrody od czoła głowicy przedstawiono na rysunku 9.

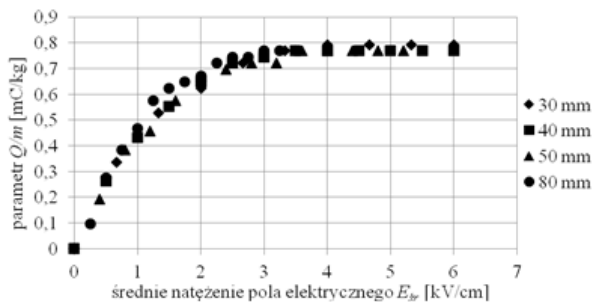
Przedstawione zależności na rysunku 9, wskazują na brak wpływu odległości pomiędzy elektrodą siatkową a głowicą na wartość parametru Q/m w warunkach utrzymania

stałej wartości natężenia pola E_{sr} w miejscu kontaktu kropli z powierzchnią siatki.

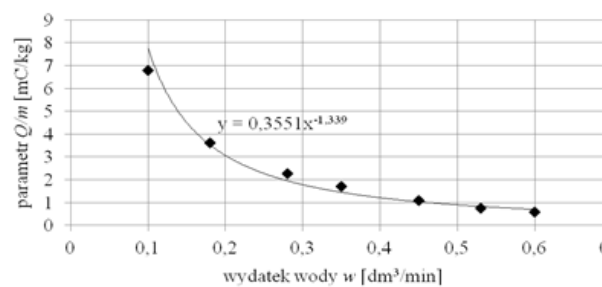
Wyniki pomiarów wykazały ponadto, że maksymalne wartości parametru Q/m , otrzymane dla standardowych warunków zasilania głowicy mediami, przy elektryzacji metodą przewodnościową, mają podobną wartość jak przy zastosowaniu elektryzacji indukcyjnej. Wartości parametru Q/m , podobnie jak w metodzie indukcyjnej, są znacznie niższe niż wynikałoby to z warunków granicznych. Wyjaśnienie zjawiska ograniczenia skuteczności elektryzacji wymagało wykonania pomiarów dla niestandardowych warunków zasilania głowicy mediami.



Rys.8. Zależność parametru Q/m od napięcia polaryzacji U_p . Standardowe warunki zasilania głowicy mediami



Rys.9. Zależność parametru Q/m od średniej wartości natężenia pola elektrycznego E_{sr} dla różnych odległości pomiędzy elektrodą siatkową a czołem głowicy l . Standardowe warunki zasilania głowicy mediami

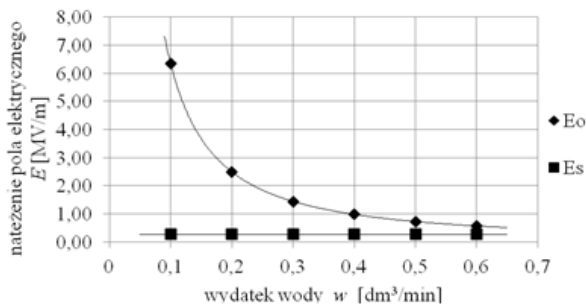


Rys.10. Zależność parametru Q/m od wydatku wody w . Warunki zasilania głowicy: $p_p = 4,0$ bary, $p_w = 4,0$ bary, $U_p = (+)12,0$ kV, $l = 30$ mm, $L = 2,0$ m

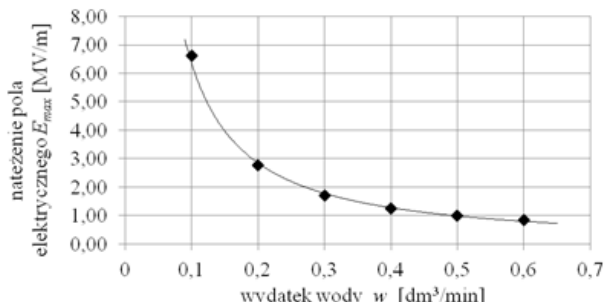
Wyniki przedstawione na rysunku 10 wykazują, że wartość parametru Q/m silnie zależy od wydatku wody. Została zaobserwowana podobna zależność jak w przypadku elektryzacji metodą indukcyjną.

W przypadku indukcyjnej metody elektryzacji kropli aerozolu, potęgową zależność $Q/m = f(w)$ łączono z efektem ekranowania. Zjawisko „ekranowania” nie może wystąpić w przypadku elektryzacji już rozproszonych kropli aerozolu, a zatem nie może być odpowiedzialny za zależność przedstawioną na powyższym rysunku.

Za silną zależność parametru Q/m od wydatku wody w odpowiada składowa pola elektrycznego E_0 związana z gęstością ładunku przestrzennego w najbliższym sąsiedztwie elektrody siatkowej niesionego przez strumień aerozolu. Zależność gęstości ładunku przestrzennego $q_v(w)$ będzie prowadzić do zależności składowej $E_0(w)$ pola działającego na krople aerozolu elektryzowane na elektrodzie siatkowej zgodnie z równaniem (3). Wpływ wydatku wody na wartości składowych pola elektrycznego E_0 i E_s przedstawiono na rysunku 11 oraz na wartość maksymalną pola elektrycznego E_{max} przedstawiono na rysunku 12



Rys. 11. Zależność natężenia pola elektrycznego E_0 , E_s od wydatku wody w. Warunki zasilania głowicy: $U_p = (+)12,0$ kV, $p_p = 4,0$ bary, $p_w = 4,0$ bary, $l = 30$ mm



Rys. 12 Zależność maksymalnego natężenia pola elektrycznego E_{max} od wydatku wody w. Warunki zasilania głowicy: $U_p = (+)12,0$ kV, $p_p = 4,0$ bary, $p_w = 4,0$ bary, $l = 30$ mm

W chmurze ładunku powstałego podczas elektryzacji tj. w strumieniu aerozolu poza elektrodą siatkową, należy spodziewać się aerozolu naładowanego bipolarnie. Bipolarna natura ładunku kropelek opuszczających obszar elektrody siatkowej wynika z obecności kropelek o różnym jego pochodzeniu. Wszystkie krople opuszczające głowicę rozpylającą posiadają ładunek wynikający z efektu elektryzacji indukcyjnej (w wyniku działania pola elektrycznego wytworzonego w obszarze elektrody siatkowa – kapilara). Część kropelek w strumieniu przechodzi przez elektrodę siatkową bez kontaktu, a ładunek który niosą można opisać parametrem $(Q/m)_{ind}$. Pozostała część strumienia wchodzi w kontakt z elektrodą siatkową, skutkiem czego następuje zmiana wartości niesionego przez nie ładunku, jak i jego znaku. Ładunek tych kropelek można opisać parametrem $(Q/m)_{przew}$. Udział kropelek w poszczególnych grupach zależy od prawdopodobieństwa ich kontaktu z elektrodą siatkową, która została oszacowana na poziomie 30%.

Wartość ładunku niesionego przez naładowaną chmurę aerozolu jest bipolarny i związany z elektryzacją przewodnościową jak i elektryzacją indukcyjną. Wartość ładunku mierzonego na elektrodach kolektora jest sumą algebraiczną ładunków związanych z elektryzacją przewodnościową i indukcyjną. Ze względu na różne znaki ładunku elektrycznego na wytworzonych kroplach, rzeczywista wartość mierzonego ładunku jest różnicą

ładunku wytworzonego przez wspomniane wyżej metody elektryzacji. Sumę (różnicę) wartości parametrów $(Q/m)_{przew}$ i $(Q/m)_{ind}$ dla różnych wydatków wody w przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Bilans parametrów Q/m związanych z elektryzacją metodą przewodnościową oraz metodą indukcyjną dla różnych wydatków wody w (0,1 – 0,6 dm³/min)

Podsumowanie

- Wprowadzenie elektrody siatkowej w strumień aerozolu z dużą prędkością gazu nie prowadzi do zasadniczych zmian w średnicy kropelek w obszarze bliskim głowicy.
- Zaobserwowana zależność parametru Q/m przy elektryzacji metodą przewodnościową może być wyjaśniona w oparciu o model z ładunkiem przestrzennym (ładunek kropelek elektryzowanych met. indukcyjną).
- Analiza źródeł oraz rozkładu natężenia pola elektrycznego w otoczeniu elektrody siatkowej umożliwiły opracowanie modelu uwzględniającego dwa źródła pola, pozwalającego wyznaczyć wartość parametru Q/m z akceptowalnym błędem (mniejszym od ok. +/- 10 %).
- Bilans ładunku niesionego przez cząstki aerozolu pozwala na dopuszczenie możliwości ograniczenia parametru Q/m przez wytrzymałość powietrza w otoczeniu elektrody.
- Wyniki pomiarów i analizy wskazują, że elektro-aerozol otrzymany metodą elektryzacji przewodnościowej zawiera krople o ładunku obu znaków – bipolarny.

Praca finansowana w ramach badań statutowych Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej.

LITERATURA

- [1] Kacprzyk R., Ulatowski W., Elektryzacja cząstek aerozoli cieczy przewodzących, *Przegląd Elektrotechniczny* R 84 10 (2008), 162-165
- [2] Bailey A.G., *Electrostatic Spraying of Liquids, Research Studies Pr Ltd* (1988)
- [3] Kacprzyk R., Żyłka P., Electrification of Aerosol Particles in Supersonic Atomizers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2011), 1353-1360
- [4] Kacprzyk R., Żyłka P., Efekt ekranowania podczas elektryzacji cząstek aerozoli w głowicach z naddźwiękowym przepływem gazu, *Przegląd Elektrotechniczny* 6 (2010), 143-146
- [5] Gajewski A., *Procesy i technologie elektrostatyczne*, PWN Warszawa-Kraków (2000), 47-49
- [6] Zhao S., Castle G. S. P., Adamiak K., Comparison of conduction and induction charging in liquid spraying, *Journal of Electrostatics* 63 (2005), 871-876
- [7] Kacprzyk R., Lewandowski M. Post-dispersion electrification of droplets in a system with pneumatic atomization *Journal of Physics. Conference Series* vol. 301, nr 1 (2011), 1-4
- [8] Milkin A. S., Galustov V. S., Cufarovskij A. I., Povyshenie effektivnosti raspylivaniya zidkostej, *Teploenergetika* No. 12 (1986)

Autorzy: dr inż. Marcin Lewandowski, Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, wyb. Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: marcin.p.lewandowski@pwr.edu.pl.