

## Efekt ekranowania podczas elektryzacji cząstek aerozoli w głowicach z naddźwiękowym przepływem gazu

**Streszczenie.** Przedstawiono model opisujący efekt ekranowania powierzchni cieczy elektryzowanej metodą indukcji elektrycznej, przez krople aerozolu. W przyjętym modelu stożek rozpraszanej cieczy jest ekranowany przez „parasol” utworzony z cząstek aerozolu. Model wskazuje na możliwość wystąpienia hiperbolicznej zależności parametru ( $Q/m$ ) od wydatku cieczy rozpraszanej. Przydatność modelu zweryfikowano doświadczalnie.

**Abstract.** A model of electrostatic shielding of the surface of atomized liquid, when electrified by induction, is described. The atomized liquid cone shielded by an “umbrella” of droplets was assumed in the proposed model. The model suggest hyperbolic type of the dependence between ( $Q/m$ ) parameter and the atomized liquid flow rate. Applicability of the model was demonstrated and confirmed experimentally. (**Shielding effect accompanying electrification of aerosol droplets produced by atomizing heads with supersonic gas flow**)

**Słowa kluczowe:** elektryzacja indukcyjna, elektro - aerozole, ekranowanie elektrostatyczne

**Keywords:** induction charging, electro-spraying, aerosol, electrostatic shielding,

### Wstęp

Dotychczasowe badania skuteczności elektryzacji kropeł aerozolu, wykonane na różnych typach głowic z rozpylaniem pneumatycznym pokazują, że zastosowanie do ich elektryzacji znanej metody indukcyjnej [1, 2] pozwala uzyskać wartość parametru ( $Q/m$ ) na poziomie 0,1 - 2,3 mC/kg, w zależności od wymiarów głowicy i warunków podawania mediów (ciśnienie powietrza, cieczy). Wymienione wartości parametru ( $Q/m$ ) uzyskuje się dla pól w obszarze elektrody indukcyjnej o natężeniu bliskim wytrzymałości powietrza.

Analiza czynników wpływających na skuteczność elektryzacji cząstek aerozoli pokazuje [3], że większość z nich (np. makswellowska stała czasu, efekt Rayleigh'a i inne), w przypadku głowic z rozpraszaniem pneumatycznym i naddźwiękowym przepływem gazu, nie mogą być przyczyną ograniczenia parametru ( $Q/m$ ).

### Efekt ekranowania

Podczas procesu elektryzacji indukcyjnej wartość ładunku indukowanego na powierzchni tworzącej się cząsteczki aerozolu zależy w sposób bezpośredni od lokalnej wartości natężenia pola w jej sąsiedztwie. Rozkład jak i wartość natężenia pola może w istotny sposób zależeć nie tylko od wartości napięcia przyłożonego do elektrody indukcyjnej oraz od geometrii układu elektryzacyjnego ale również od obecności innych, zwłaszcza naładowanych elektrycznie obiektów. Obiektem takim może być naładowana, nowo utworzona cząsteczka aerozolu, dla kolejnej tworzonej cząsteczki. Oddziaływanie cząsteczki nowo utworzonej (naładowanej) na tworzoną można próbować zamodelować tzw. efektem ekranowania. Uproszczony model ekranowania cząstek [3,4]

wskazuje na niewielki wpływ wymienionego efektu w przypadku, jeżeli elektryzacji indukcyjnej poddawane są indywidualne krople o średnicy porównywalnej ze średnicą przewodzącej cieczy kapilary.

Badania wpływu konduktywności cieczy rozpraszanej na wartość parametru ( $Q/m$ ) oraz oszacowania czasu tworzenia kropeł przy rozpraszaniu naddźwiękowym prowadziły do wniosku, że ograniczenia wartości ( $Q/m$ ) nie mogą wynikać z długiej maxwellowskiej stałej czasu dla rozpraszanej cieczy lub z innych powodów [3].

W przypadku rozpraszania pneumatycznego z naddźwiękowym przepływem powietrza założono, że występuje możliwość ekranowania elektrostatycznego stożka rozpraszanej cieczy przez odrywające się od niego krople wytwarzanego aerozolu, tworzące rodzaj parasola ekranującego stożek rozpraszanej cieczy.

### **Charakterystyczne cechy procesu rozpraszania naddźwiękowego**

Dokumentacja fotograficzna procesu tworzenia aerozolu w warunkach rozpraszania naddźwiękowego wykazała występowanie w trakcie procesu pewnych regularności. Wśród nich można wymienić:

- tworzenie się stożka rozpraszanej cieczy (ciągłego, przewodzącego) na końcu przewodzącej ją kapilary – patrz rysunek 1;
- okresowe falowanie strumienia wytwarzanego aerozolu – patrz rysunek 2.



Rys.1. Fotografia końca kapilary przewodzącej ciecz w warunkach przepływu powietrza wokół niej z prędkością naddźwiękową. Widoczny stożek rozpraszanej cieczy

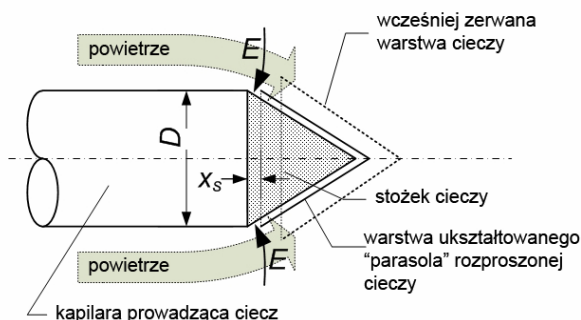


Rys.2. Fotografia końca kapilary przewodzącej ciecz w warunkach przepływu powietrza wokół niej z prędkością naddźwiękową. Widoczny okresowy charakter zmian gęstości aerozolu [5]

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

### **Uproszczony model zjawiska ekranowania**

W modelu przyjęto występowanie zjawiska elektrostatycznego ekranowania stożka cieczy rozpraszanej przez przewodzącą warstwę cieczy (kropli) „zrywanych” z jego powierzchni przez strumień powietrza. Zrywana warstwa cieczy – kropli tworzy „parasol” ekranujący utworzony stożek przed działaniem pola elektrycznego wytwarzanego w obszarze stożek/kapilara – elektroda indukcyjna. Szkic modelu warstwy ekranującej przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Model stożka cieczy rozpraszanej ekranowanego przez „parasol” rozpraszanej cieczy – kropli

Przyjęto następujące założenia i uproszczenia:

1. rozpraszana ciecz jest przewodząca a jej maxwellowska stała czasu jest znacznie mniejsza od czasu tworzenia kropli;
2. podczas atomizacji, ze stożka cieczy powstającego na końcu kapilary, „zrywana” jest niestabilna, rozpadająca się warstwa cieczy-kropli w formie „parasola”, który obejmuje znaczną powierzchnię stożka cieczy i tym samym ekranuje go przed działaniem pola elektrycznego;
3. grubość zrywanej warstwy cieczy jest porównywalna ze średnicą kropli tworzonego aerozolu, stała na całej powierzchni „parasola” i nie zależy od stopnia pokrycia przez nią powierzchni stożka;
4. warstwa cieczy (parasol) jest „zrywana” okresowo, przy czym czas powtarzania „zerwań”  $t_r$  określony jest szybkością przepływu strumienia powietrza w otoczeniu kapilary i w pierwszym przybliżeniu nie zależy od szybkości podawania (wydatku) cieczy  $g$  ani stopnia pokrycia stożka powierzchnią ekranującą;
5. efekt ekranowania można obniżyć podając na tyle małą ilość rozpraszanej cieczy, aby nie mogła się wykształcić warstwa „parasola”;
6. długość tworzącej stożka cieczy rozpraszanej jest równa średnicy jego podstawy (średnicy kapilary).

Objętość cieczy w warstwie zrywanej  $v_z$  można określić, przyjmując spełnione założenia (3) i (8), z zależności:

$$(1) \quad v_z = \frac{\pi}{2} K_1 d D^2$$

gdzie:  $D$  – średnica podstawy stożka (kapilary),  $K_1$  - stała bezwymiarowa,  $d$  - średnica kropli aerozolu.  
 Warstwa „parasola” może objąć całą powierzchnię stożka, jeżeli ilość cieczy rozpraszanej  $v_1$ , dostarczonej w określonym czasie  $t$  jest równa lub większa od ilości cieczy  $v_2$  koniecznej do wytworzenia warstwy „zrywanej”. Można zatem określić graniczną prędkość  $g_g$  (graniczny wydatek cieczy), powyżej której „warstwa zrywana” wytworzy się nad całą powierzchnią stożka. Wymieniony stan określa warunek:

$$(2) \quad v_z = v_1$$

który można zapisać w postaci:

$$(3) \quad g_g = \frac{\pi K_1 D^2 d}{2 t_r}$$

gdzie:  $t_r$  – jest okresem, po którym następuje „zerwanie warstwy” rozpraszanej cieczy.

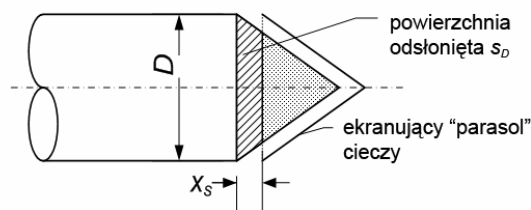
Zakładając niezależności grubości „warstwy zrywanej” od stopnia pokrycia (zał. 4) można dla wydatków cieczy  $g < g_g$ , wyznaczyć pole powierzchni stożka cieczy, na którym nie wytworzyła się „warstwa zrywana” -  $s_0$ . Określa ją zależność:

$$(4) \quad s_0 = s_b \left( 1 - \frac{g}{g_g} \right)$$

Pole elektryczne  $E$  działa na całą nie ekranowaną powierzchnię stożka  $s_E$  gdzie:

$$(5) \quad s_E = s_D + s_0$$

gdzie:  $s_D$  - jest powierzchnią odsłoniętą na skutek przemieszczania się warstwy cieczy w czasie równym  $t_r$ , jak to przedstawiono na Rysunku 4.



Rys.4. Model stożka z odsłoniętą powierzchnią  $s_D$

Zakładając dodatkowo, że wysokość odsłoniętego stożka  $x_s$  spełnia warunek  $x_s \ll D$ , można ją wyznaczyć z przybliżonej zależności:

$$(6) \quad x_s \cong \frac{4g t_r}{\pi D^2}$$

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

gdzie:  $\mathcal{G}_r$  – jest objętością cieczy dostarczonej do tworzenia stożka (do głowicy) w czasie  $t_r$ .

Korzystając z zależności (6) otrzymuje się ostatecznie dla powierzchni  $s_D$  wyrażenie:

$$(7) \quad s_D \cong \pi D x_s = \frac{4\mathcal{G}_r}{D}$$

Z punktu widzenia wielkości ekranowanej powierzchni stożka rozpylanej cieczy można rozważyć dwa przypadki: przypadek tzw. dużego wydatku cieczy, kiedy  $\mathcal{G} \geq \mathcal{G}_g$ , oraz małego wydatku, dla którego  $\mathcal{G} < \mathcal{G}_g$ .

### **Przypadek dużego wydatku wody**

W przypadku dużego wydatku cieczy rozpraszanej, kiedy  $\mathcal{G} \geq \mathcal{G}_g$ , „warstwa zrywana” wytwarza się na całej powierzchni stożka z wyłączeniem świeżo utworzonej powierzchni  $s_D$  przez ciecz dostarczoną w czasie  $t_r$ . Pole elektryczne indukuje ładunek jedynie na odsłoniętej powierzchni stożka  $s_E$ . równej:

$$(8) \quad s_E = s_D = s_{ED}$$

Korzystając z założenia (6) ładunek  $Q_D$  indukowany na całej powierzchni  $s_{ED}$  będzie równy:

$$(9) \quad Q_D = \varepsilon_0 E s_{ED} = \frac{4\varepsilon_0 E \mathcal{G}_r}{D}$$

Ładunek  $Q_D$  został wytworzony na cieczy o objętości  $v_r$ , dostarczonej w czasie  $t_r$ , przy czym:

$$(10) \quad v_r = \mathcal{G}_r$$

Dzieląc zależność (9) przez (10) oraz uwzględniając gęstość rozpraszanej cieczy  $\rho = m/v$  otrzymuje się wartość parametru  $(Q/m)$  dla przypadku dużego wydatku cieczy:

$$(11) \quad (Q/m)_D = \frac{4\varepsilon_0 E}{\rho D}$$

gdzie:  $m$  – masa,  $v$  – objętość cieczy rozpraszanej w czasie  $t_r$ .

Zależność (11) pokazuje, że w przypadku dużego wydatku cieczy rozpraszanej, tzn. kiedy  $\mathcal{G} \geq \mathcal{G}_g$ , wartość parametru  $(Q/m)$  nie zależy od  $\mathcal{G}$ .

### **Przypadek małego wydatku wody**

W przypadku małego wydatku cieczy „warstwa zrywana” pokrywa jedynie część całej powierzchni stożka. Powierzchnia odsłonięta  $s_E$ , na którą działa pole elektryczne, będzie określona zależnością:

$$(12) \quad s_E = \frac{\pi}{2} D^2 \left( 1 - \frac{g}{g_g} \right) + \frac{4g\gamma_r}{D} = s_{EM}$$

Ładunek  $Q_M$  indukowany na powierzchni  $s_{EM}$  będzie:

$$(13) \quad Q_M = \varepsilon_0 E s_{EM}$$

zaś wartość parametru  $(Q/m)_M$  określi wyrażenie:

$$(14) \quad (Q/m)_M = \frac{\pi D^2 \varepsilon_0 E}{\gamma_r} \left( \frac{1}{g} - \frac{1}{g_g} \right) + \frac{4\varepsilon_0 E}{D\gamma}$$

Dla przypadku bardzo małego wydatku cieczy rozpraszanej, tzn. dla spełnionego warunku  $g \ll g_g$ , czynnik  $(1/g_g)$  można pominąć a zależność (2.18) przejdzie do postaci:

$$(15) \quad (Q/m)_{BM} = \frac{\pi D^2 \varepsilon_0 E}{g\gamma_r} + \frac{4\varepsilon_0 E}{D\gamma}$$

Zależność (15) pokazuje, że w przypadku małego wydatku cieczy wartość parametru  $(Q/m)$  zawiera składową stałą (jak dla przypadku dużego wydatku - zależność (11)) oraz składową zależną hiperbolicznie od wydatku cieczy rozpraszanej  $g$ . Różnica parametrów  $(Q/m)_M$  dla małego i  $(Q/m)_D$  - dla dużego wydatku cieczy będzie zatem określona zależnością:

$$(16) \quad (Q/m)_M - (Q/m)_D = \frac{\pi D^2 \varepsilon_0 E}{g\gamma_r}$$

Zależność (16) wskazuje, że różnica wartości  $(Q/m)_M$  i  $(Q/m)_D$ , obserwowana w zakresie bardzo małych wydatków powinna być zależna hiperbolicznie od wydatku cieczy rozpraszanej  $g$ .

#### **Układ pomiarowy do badania właściwości elektrycznych głowic**

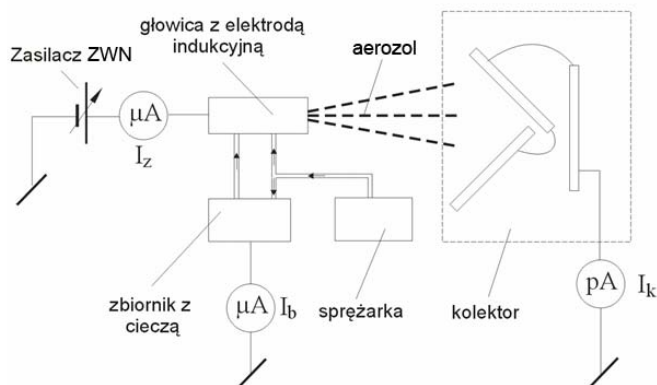
Układ pomiarowy do badania właściwości elektrycznych głowic, w tym parametru  $(Q/m)$ , omówiono w pracy [3] i przedstawiono na rysunku 5.

Do polaryzacji elektrody indukcyjnej zastosowano regulowane zasilacze wysokiego napięcia stałego ZWN typu Glassman 0-40 kV, zaś do pomiarów prądów analogowy pikoamperomierz PA-100 (prąd kolektora  $I_k$ ) oraz mikroamperomierze magnetoelektryczne LG-1. W układzie wykorzystano kolektor z elektrodami tłumiącymi oraz procedurę wyznaczania parametru  $(Q/m)$ , opisaną w pracy [3]. Wartość parametru  $(Q/m)$  wyznaczano na podstawie zależności:

$$(17) \quad (Q_0/m) = \frac{I_k t_k}{V_k \gamma}$$

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

gdzie:  $I_k$  – ustalona wartość prądu chmury dla określonych warunków elektryzacji oraz przepływu mediów (wody i powietrza),  $\gamma$  – gęstość medium rozpraszanego (wody),  $V_k$  – objętość rozpraszanej cieczy, zebranej na kolektorze w czasie  $t_k$ .



Rys.5. Schemat układu pomiarowego do badania parametru ( $Q/m$ ).  $I_z$  – prąd elektrody indukcyjnej,  $I_b$  – prąd doziemny,  $I_k$  – prąd kolektora

### **Wpływ wydatku wody na wartość parametru ( $Q/m$ ) dla głowicy EFEN 110,5**

Badania wpływu wydatku wody na wartość parametru ( $Q/m$ ) wykonano dla głowicy typu EFEN110,5 przeznaczonej do opryskiwaczy dla celów agrotechnicznych. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 6.

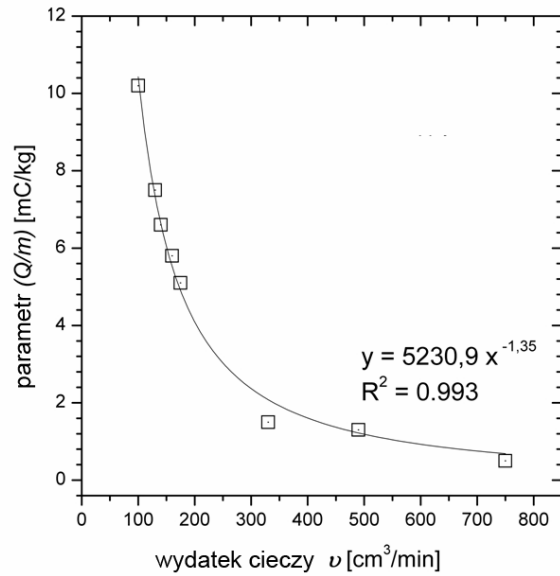
Na charakterystyce zaznaczono punkty pomiarowe, zaś linia ciągła przedstawia aproksymującą funkcję hiperboliczną. Otrzymane dane wskazują na możliwość otrzymania dużych wartości parametru ( $Q/m$ ) dla małych, tzn. znacznie mniejszych od standardowych, wydatków wody. Obserwowana zależność nie jest ściśle hiperboliczna, jak na to wskazuje wyrażenie (15) lub (16).

Otrzymana krzywa może jednak być aproksymowana funkcją potęgową typu:

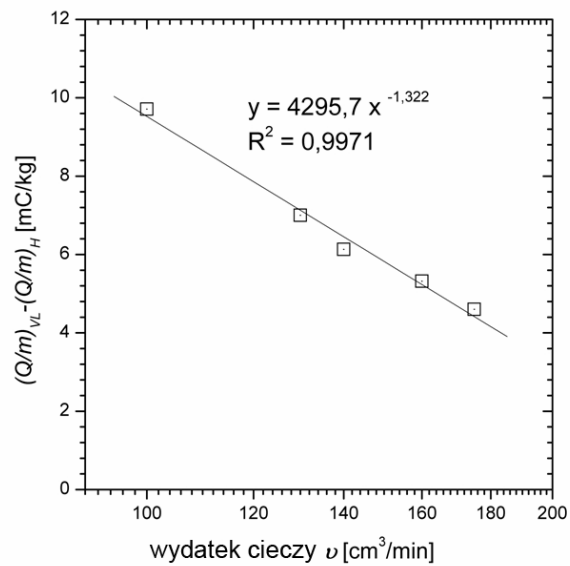
$$(18) \quad y = Ax^n$$

gdzie  $A$  jest stałą ( $A= 5231$ ), zaś  $n=-1.35$ .

Charakterystykę wyznaczoną zgodnie z zależnością (16) we współrzędnych logarymicznych przedstawiono na rysunku 7. Współczynnik zgodności krzywej teoretycznej i doświadczalnej osiąga dla wymienionej zależności wartość  $R^2=0.997$ . Również w tym przypadku zależność różnicy  $(Q/m)_M - (Q/m)_D$  od wydatku wody  $g$  nie jest hiperboliczna. Mniejsza wartość wykładnika ( $n=-1.32$ ) wskazuje na występowanie, innego, oprócz efektu ekranowania, dodatkowego czynnika, wpływającego na wartość parametru ( $Q/m$ ). Czynnikiem takim może być zależność parametru ( $Q/m$ ) od średnicy kropelek.



Rys.6. Zależności parametru  $(Q/m)$  dla głowicy EFEN 110,5 od wydatku rozpylanej wody  $\varrho$ . Pomiary wykonano dla wody o konduktywności  $\sigma = 0.4 \text{ mS/cm}$  w warunkach: napięcie na elektrodzie indukcyjnej  $U=2.0 \text{ kV}$ , odległość głowica – kolektor  $l=2\text{m}$



Rys.7. Zależność różnicy wartości  $(Q/m)_M - (Q/m)_D$  dla głowicy EFEN 110,5 od wydatku wody  $\varrho$ . Pomiary wykonano dla wody o konduktywności  $\sigma = 0.4 \text{ mS/cm}$  w warunkach: napięcie na elektrodzie indukcyjnej  $U=2.0 \text{ kV}$ , odległość głowica – kolektor  $l=2\text{m}$



## **VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy rozwojowy R01 015 03.*

### LITERATURA

- [1] Sugimoto T., Tanaka S., Higashiyama Y R., Formation of a Charged Droplets Cloud and Corona Discharge Between the Cloud and a Grounded Electrode. *IEEE Trans. Industr. Appl.* 35 (1999) 225-230.
- [2] Kacprzyk R., Ulatowski W., Elektryzacja cząstek aerozoli cieczy przewodzących, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), 162-165.
- [3] Kacprzyk R., Ulatowski W., Żyłka P., Projekt modelu głowicy elektro-aerozolowej do zastosowań agrotechnicznych oraz stanowisk do testów głowic agrotechnicznych. Raport IPEiE, nr I-7/SPR/14/2008, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2008.
- [4] Crowley J.M., Fundamentals of applied electrostatics, J. Wiley & Sons, N.Y., 1986.
- [5] Tarnogrodzki A., Dynamika gazów. Przepływy jednowymiarowe i fale proste, WKŁ, Warszawa, 2003

---

**Autorzy:** dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk, prof. nadzw., Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii,  
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław,  
E-mail: [ryszard.kacprzyk@pwr.wroc.pl](mailto:ryszard.kacprzyk@pwr.wroc.pl);  
dr inż. Paweł Żyłka, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wyb. Wyspiańskiego 27,  
50-370 Wrocław,  
E-mail: [pawel.zylka@pwr.wroc.pl](mailto:pawel.zylka@pwr.wroc.pl);

