

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

P R A C E
I N S T Y T U T U M A S Z Y N
P R Z E P Ł Y W O W Y C H

T R A N S A C T I O N S
O F T H E I N S T I T U T E O F F L U I D - F L O W M A C H I N E R Y

89

W A R S Z A W A - P O Z N A Ń 1989

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA — EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY — CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1989

Printed in Poland

ISBN 83-01-07072-2
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 300 + 90 egz. Ark. wyd. 13,25. Ark. druk. 10,5. Papier offsetowy kl. IV, 71g.

B-1. Oddano do składania w kwietniu 1987 r. Podpisano do druku w marcu 1989 r.

Druk ukończono w grudniu 1989 r. Zam. 90/89 K-8/66

SKŁAD WYKONANO W ZAKŁADACH GRAFICZNYCH im. KEN w BYDGOSZCZY
DRUK ZAKŁAD POLIGRAFII WSP W ZIELONEJ GÓRZE

ANATOL JAWOREK

Gdańsk

Elektryzowanie aerozolu wodnego w obszarze wyładowania ulotowego*

Opisano sposób elektryzowania aerozolu wodnego w obszarze wyładowania ulotowego w płasko-równoległym układzie elektrod. Wyznaczono charakterystyki elektryczne i przepływowe układu elektryzacyjnego. Wyprowadzono zależność na rozkład ładunku unoszonego przez krople o danym promieniu oraz zależność na całkowity prąd przenoszony przez aerozol.

1. Wstęp

Przedstawiono sposób elektryzowania aerozolu wodnego za pomocą wyładowania ulotowego z elektrody wielospilkowej tworzącej z anodą prętową układ kondensatora płaskiego. W przeprowadzonym eksperymencie aerozol wytwarzano za pomocą rozpylacza pneumatycznego o przepływie równoległym, w którym ciecz znajduje się wewnątrz strugi gazowej. Struga aerozolu porusza się prostopadłe do prądu jonowego generowanego przez wyładowanie ulotowe.

Wykorzystując rozkład promieni kropeł opisany równaniem Nukiyamy-Tanasawy oraz zależność ładunku zgromadzonego na kroplach od ich średnicy, wyprowadzono wyrażenie na gęstość rozkładu ładunku unoszonego przez poszczególne krople aerozolu oraz obliczono całkowity prąd unoszony przez aerozol.

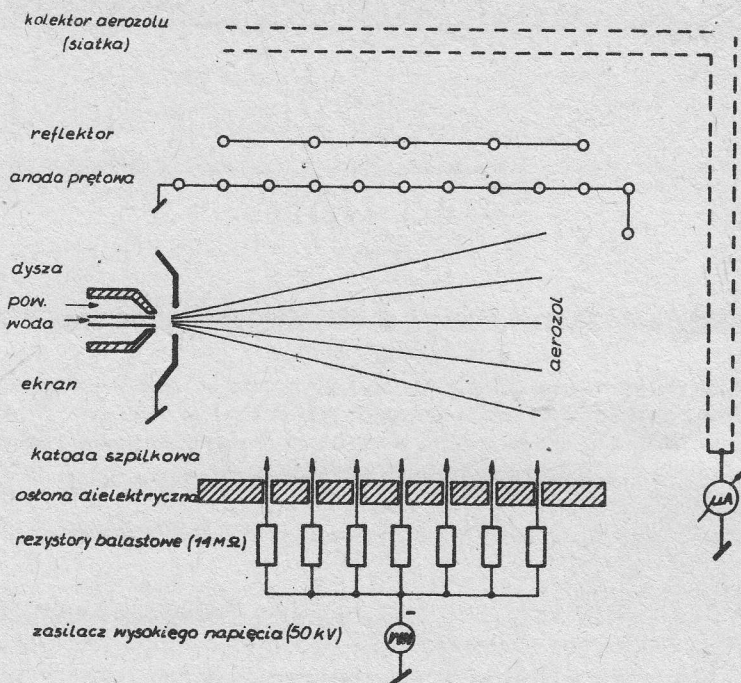
2. Układ badawczy

Wyładowanie ulotowe wytwarzane jest przez elektrody szpilkowe zasilane przez indywidualne rezystory balastowe ze wspólnego źródła wysokiego napięcia (rys. 1). Ten sposób zasilania, w porównaniu z układem o wspólnym rezystorze balastowym, umożliwia osiągnięcie wyższego natężenia pola w obszarze elektryzacji przy tym samym napięciu zasilającym, a tym samym zwiększenie efektywności ładowania cząstek aerozolu. Ponadto, powstanie wyładowania iskrowego z jednej ze szpilek nie powoduje ograniczenia wyładowania ulotowego w całym obszarze.

Dla ustalonego napięcia zasilania U_0 rezystancję balastową dobiera się ze względu na wygaszanie wyładowania iskrowego. Wartość każdej z rezystancji powinna wynosić:

$$R_i \geq \frac{U_0 - U_s}{I_s} \quad (1)$$

* Praca wykonana w ramach planu C1 (badania własne placówki).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

przy czym U_s — napięcie gaśnięcia wyładowania iskrowego, I_s — prąd wyładowania iskrowego. Dla tak dobranej rezystancji napięcie na każdej ze szpilek, przy braku wyładowania iskrowego wynosi

$$U_i = U_0 - I_c R_i = U_0 - \frac{I_c}{I_s} (U_0 - U_s), \quad (2)$$

gdzie I_c — prąd wyładowania koronowego z i -tej szpilki.

Średnie natężenie pola elektrycznego w obszarze oddalonym od szpilek można wyrazić przybliżonym wzorem

$$E = \frac{U_i}{d}, \quad (3)$$

w którym d — odległość końców szpilek od anody prętowej. Wyprowadzenie to nie uwzględnia efektów brzegowych, ładunku przestrzennego oraz obecności zatamizowanej cieczy (zmiany wypadkowej przenikalności elektrycznej ośrodka) na efektywną wartość natężenia pola.

Naprzeciw katody szpilkowej znajduje się uziemiona anoda wykonana z prętów o średnicy 3 mm odległych od siebie o ok. 15 mm. Konstrukcja taka umożliwi przepływ aerozolu unoszonego przez tzw. wiatr elektronowy, wywołowany przez elektrony emitowane przez szpilki. Za anodą umieszczona jest siatka bierna, wykonana również z prętów z odstępem ok. 30 mm. Siatka ta odizolowana od ziemi, ładowana jest przez jony lekkie oraz aerozol do potencjału ujemnego i wytwarza względem anody pole elektryczne zwracające jony o dużej ruchliwości, a więc lekkie jony powietrza, które zniekształciłyby wynik pomiarów, gdyby trafiły do kolektora

aerozolu. Cząstki aerozolu o dużej bezwładności (dużej masie) nie są hamowane na odcinku między anodą a siatką bierną. Kolektor prądu unoszonego przez aerozol tworzy podwójna siatka o małej przezroczystości (oczka o wymiarach ok. 1×1 mm), ukształtowana w ten sposób, aby wychwytywać zarówno aerozol poruszający się prosto z dyszy, jak również aerozol unoszony przez wiatr elektronowy.

3. Elektryzowanie aerozolu w wyladowaniu ulotowym

Wyróżnić można trzy mechanizmy elektryzowania cząstek aerozolu przez jony w wyladowaniu ulotowym. Pierwszy, polega na zderzeniach dryfujących w polu elektrycznym jonów z napotkaną cząstką. Drugi, spowodowany jest termicznymi zderzeniami jonów z cząstkami aerozolu. Jeśli cząstki aerozolu posiadają dostatecznie dużą prędkość możliwy jest wychwyt napotkanych na drodze jonów lekkich.

Wyrażenie na ładunek uzyskany przez cząstki aerozolu wyprowadza się przy upraszczających założeniach: kulistego kształtu cząstek, braku oddziaływania między cząstkami aerozolu, równomiernego rozkładu pola elektrycznego w obszarze elektryzacji, braku wpływu ładunku przestrzennego na efektywną wartość natężenia pola. Ponadto przyjmuje się, że jony lekkie poruszają się po liniach pola, pomijając Brownowski charakter ruchu termicznego.

Maksymalny ładunek zgromadzony na cząstce aerozolu w wyniku elektryzacji w polu elektrycznym wyraża się zależnością [1]

$$Q = \frac{4\pi\epsilon_0 Er_0^2 \left(1 + 2\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}\right)}{1 + \frac{4\epsilon_0 E b v_a}{ne}}, \quad (4)$$

gdzie r_0 — promień cząstki aerozolu, ϵ_r — względna przenikalność elektryczna cząstki, b — długość elektrody emisyjnej w kierunku poprzecznym do strumienia aerozolu, v_a — prędkość cząstki aerozolu, e — ładunek elementarny, n — liczba jonów przepływających w jednostce czasu przez obszar elektryzacji.

Mianownik wyrażenia (4) uwzględnia skończony czas przebywania aerozolu w obszarze wyladowania ulotowego. Dla gęstości liniowej prądu spełniającej warunek

$$\frac{ne}{b} \gg 4\epsilon_0 E v_a \quad (5)$$

można przyjąć, że mianownik jest równy jedności (w praktyce wystarcza jeśli różni się o parę procent od jedności). Dla cząstek przewodzących ($\epsilon_r \rightarrow \infty$) wyrażenie (4) upraszcza się do postaci:

$$Q = 12\pi\epsilon_0 Er_0^2. \quad (6)$$

Dla uzyskiwanych w eksperymencie średnich cząstek aerozolu dominujący jest opisany sposób elektryzacji i wpływ pozostałych dwóch mechanizmów na prąd unoszony przez aerozol nie będzie dalej uwzględniany.

4. Rozkład promieni kropli

Brak jest dotychczas ściślejszej teorii rozkład promieni kropli wytwarzanych przez dany rodzaj rozpylacza. Istniejące opisy matematyczne są zwykle aproksymacją wyników pomiarów i nie uwzględniają wszystkich parametrów cieczy i warunków rozpylania.

Jednym z powszechnie używanych rozkładów promieni kropli jest rozkład Nukiyamy-Tanasawy [2, 3] bazujący na funkcji

$$f(r_0) = Br_0^2 \exp(-\beta r_0^\delta). \quad (7)$$

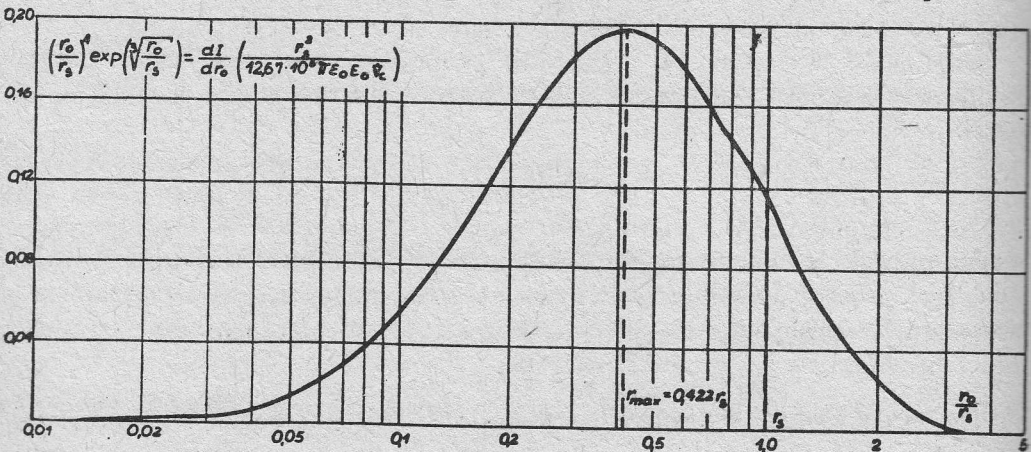
W rozkładzie (7) parametry B , β , δ określa się na podstawie danych doświadczalnych. Parametr B obliczany jest na podstawie całkowitego natężenia objętościowego rozpylanej cieczy \dot{V}_c . Parametr β wyznacza się z definicji średniego promienia Sautera będącego miarą stosunku sumarycznej objętości kropli do ich sumarycznej powierzchni [2, 4]. Zależność tę uzyskaną również przez Nukiyamę i Tanasawę można znaleźć np. w [2]. Parametr δ dobiera się ze względu na najmniejszą rozbieżność między krzywą aproksymującą a zmierzonym rozkładem rzeczywistym. Według [3 i 4] najlepszą zgodność rezultatów uzyskuje się dla $\delta = 1/3$

Ostatecznie funkcja gęstości rozkładu promieni kropli przyjmuje postać

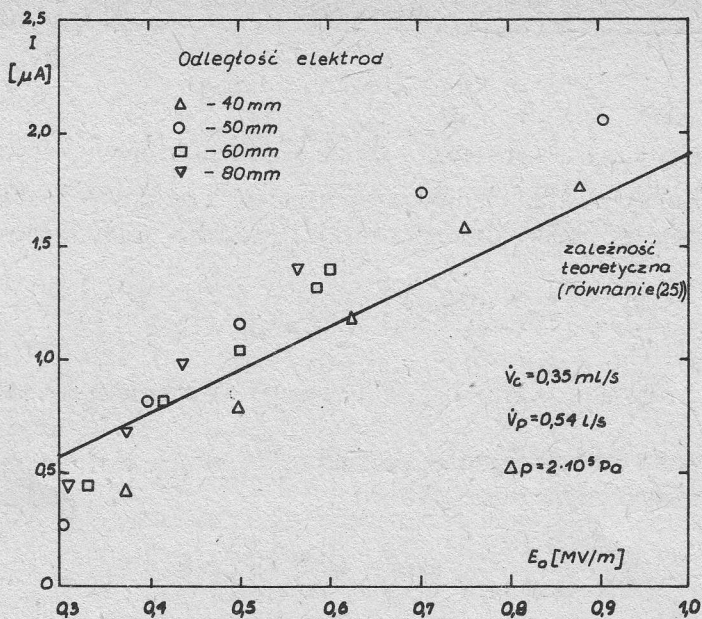
$$f(r_0) = 1,056 \cdot 10^6 \frac{\dot{V}_c}{r_s^4} \left(\frac{r_0}{r_s}\right)^2 \exp\left(-16 \sqrt[3]{\frac{r_0}{r_s}}\right). \quad (8)$$

5. Prąd unoszony przez aerozol

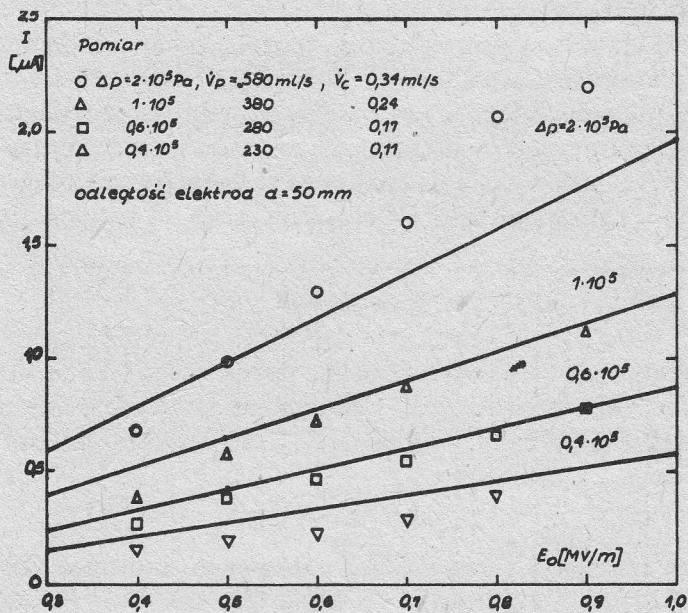
Przedstawione wyrażenia na ładunek cząstki i rozkład promieni kropli wykorzystane zostały do wyznaczenia prądu unoszonego przez aerozol. Ładunek unoszony przez cząstki aerozolu o danym promieniu r_0 w jednostce czasu jest iloczynem ładunku zgromadzonego na kropli o danym promieniu i gęstości rozkładu promieni



Rys. 2. Wykres gęstości rozkładu ładunku unoszonego przez aerozol



Rys. 3. Natężenie prądu unoszonego przez aerozol w zależności od natężenia pola elektrycznego dla różnych odległości elektrod



Rys. 4. Natężenie prądu unoszonego przez aerozol w zależności od natężenia pola elektrycznego przy różnych ciśnieniach zasilania dyszy rozpylacza

kropel

$$\frac{dI}{dr_0} = Q(r_0)f(r_0). \quad (9)$$

Przyjmując za funkcję rozkładu ładunku zależność (6), a za funkcję rozkładu promieni kropel wyrażenie (8), funkcję opisującą rozkład natężenia prądu można sprowadzić do postaci:

$$\frac{dI}{dr_0} = \frac{12,67 \cdot 10^6 \pi \epsilon_0 E \dot{V}_c}{r_s^2} \left(\frac{r_0}{r_s}\right)^4 \exp\left(-16 \sqrt[3]{\frac{r_0}{r_s}}\right). \quad (10)$$

Wykres gęstości rozkładu ładunku zgromadzonego na kropkach przedstawiono na rysunku 2.

Znormalizowana funkcja gęstości rozkładu (10) osiąga ekstremum w punkcie $r_{\max} = 0,422r_s$ wyznaczonym z warunku

$$\frac{d}{dr_0} \left[\left(\frac{r_0}{r_s}\right)^4 \exp\left(-16 \sqrt[3]{\frac{r_0}{r_s}}\right) \right] = 0. \quad (11)$$

Całkowity prąd unoszony przez aerozol jest całką z wyrażenia (10) i wynosi:

$$I = \frac{2,88 \pi \epsilon_0 E \dot{V}_c}{r_s}. \quad (12)$$

Zależność (12) została porównana z danymi pomiarowymi na rysunku 3 (odległość międzyelektrodowa występuje jako parametr) oraz na rysunku 4 (parametrem jest ciśnienie zasilania dyszy rozpylacza).

Wyrażenie (12) umożliwia przewidywanie wartości natężenia prądu unoszonego przez aerozol z kilkuprocentowym błędem. Powstające rozbieżności można wyjaśnić przybliżonym charakterem zależności na rozkład promieni kropel (8) oraz poczynionymi założeniami upraszczającymi dotyczącymi rozkładu pola elektrycznego w obszarze elektryzacji. W zakresie niskich natężeń pól elektrycznych rozbieżność spowodowana jest tym, że wyładowanie ulotowe rozpoczyna się od natężenia ok. 10^5 V/m.

6. Zakończenie

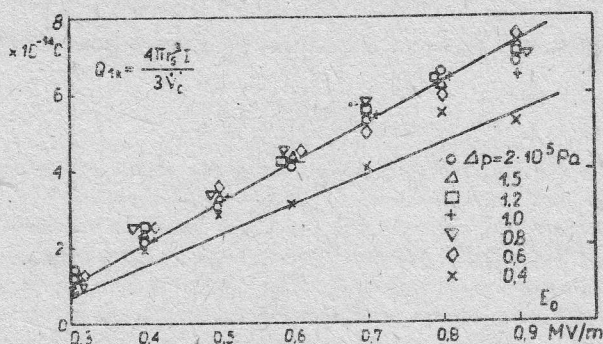
Kryterium efektywności elektryzacji można sformułować jako bezwzględną wartość ładunku unoszonego przez kroplę o pewnej wielkości uśrednionej, np. o promieniu Sautera. Zależność ładunku przypadającego na kroplę o promieniu Sautera, wyznaczoną z relacji

$$Q_{1k} = 3,84 \pi^2 r_s^2 \epsilon_0 E \quad (13)$$

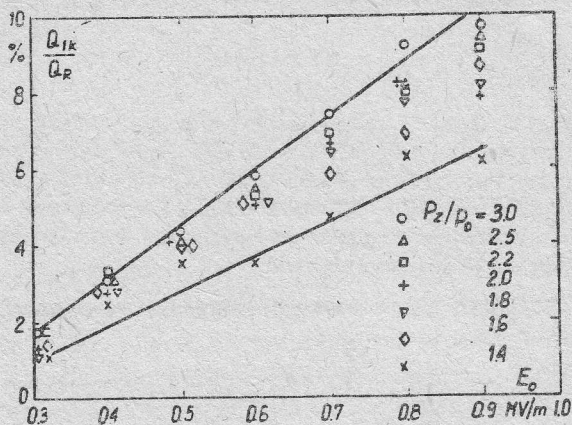
przedstawiono na rysunku 5. Linią ciągłą przedstawiono zależność teoretyczną (13).

W postaci bezwymiarowej stosuje się kryterium stosunku średniego ładunku unoszonego przez krople do limitu Rayleigha dla danego promienia kropli

$$\frac{Q_{1k}}{Q_r} = 0,679 \pi E \sqrt{\frac{\epsilon_0 r_s}{\gamma_c}}. \quad (14)$$



Rys. 5. Zależność ładunku unoszonego przez kroplę o zastępczym promieniu Sautera r_s od natężenia pola elektrycznego i ciśnienia zasilania dyszy rozpylacza



Rys. 6. Porównanie ładunku unoszonego przez kroplę o zastępczym promieniu Sautera z limitem Rayleigha

Wykres zależności (14) przedstawiono na rysunku 6, wykreślając linią ciągłą dwie zależności teoretyczne.

W przeprowadzonym eksperymencie ograniczono się tylko do porównania natężenia prądu i średniego ładunku unoszonego przez kroplę aerozolu wyznaczonych z zależności teoretycznych z wynikami pomiarów. Dalsze badania powinny prowadzić do zweryfikowania modelu rozkładu promieni kropeł i zgromadzonego na nich ładunku. Rezultaty te mogą posłużyć do wyboru warunków elektryzacji i rozpylania czynnika z punktu widzenia pożądanego ładunku i wielkości kropli dla danego procesu.

Praca wpłynęła do Redakcji w styczniu 1984 r.

Literatura

- [1] J. Böhm, *Electrostatic Precipitators*. SNTL/Elsevier, Praha 1982.
- [2] Z. Orzechowski, *Rozpylanie cieczy*. WNT, Warszawa 1976.
- [3] H. C. Lewis et al, *Atomization of Liquids in High Velocity Gas Streams*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 40, No 1 (1948), s. 67—74.
- [4] R. A. Mugele, H. D. Evans, *Droplet Size Distribution in Sprays*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 43, No 6 (1951), s. 1317—24.

Электризирование водного аэрозоля в области коронного разряда

Резюме

Описаны способ и система электризования водного аэрозоля в области коронного разряда. Разряд производился с помощью многобулавочной электроды с булавками снабжаемыми индивидуальными балластными резисторами. Выведены формулы определяющие распределение заряда уносимого каплями данного радиуса, а также полный ток уносимый аэрозолем в зависимости от параметров распыляемой жидкости и силы электрического тока в области электризования. В процессе выведения формул использовано распределение Нукиямы-Танасавы, описывающее распределение радиусов капель и предположена дрейфная модель электризования аэрозоля.

Charging Water Aerosol in a Corona Discharge

Summary

The method and set-up for charging water aerosol in a corona discharge have been described. The discharge has been produced by a multiple-pin electrode with the pins fed via individual ballast resistors. Relations describing the distribution of charge of droplets according to their size and the total current carried by aerosol, expressed in terms of parameters of the liquid atomized and the electric field intensity in the charging region, have been derived based on the Nukiyama — Tanasawa distribution of droplet size and assumption of the drift model of aerosol charging.