

УДК 537.525:539.19

Л.В. Месарош

Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, Ужгород, 88000  
e-mail: liviamesarosh@gmail.com

## ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ ПЛАЗМИ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ НАД ПОВЕРХНЕЮ ВОДНОГО РОЗЧИНУ СУЛЬФАТУ АЛЮМІНІЮ

Для тліючого розряду з рідинним катодом на основі дистильованої води та водного розчину  $Al_2(SO_4)_3$  приведено зміну концентрації електронів із зміною струму розряду від 12 до 36 мА.

**Ключові слова:** тліючий розряд, водний розчин сульфату алюмінію, дистильована вода, катодна пляма, концентрація електронів.

### Вступ

Газовий розряд між металевим анодом та рідинним катодом відзначається простотою реалізації та керування, можливістю роботи при атмосферному тиску повітря та температурі навколишнього середовища, дешевизною вихідних матеріалів. Такий розряд застосовується у плазмохімії для синтезу та конверсії хімічних сполук в об'ємі розряду та на поверхні рідини, в екології для очистки води та повітря [1] переробки відходів, у медицині, у сільському господарстві та харчовій промисловості для знезараження поверхонь внаслідок безконтактної дії, при обробці та модифікації поверхонь різного роду матеріалів [2]. У праці [3] представлено використання розряду для синтезу наночасток, у фізиці плазми та для спектроскопічного аналізу розчинів.

У праці [4] показано, що в розряді з електролітним катодом при струмі  $I=25$  мА, концентрація електронів  $n_e=2,12 \times 10^{12}$  см<sup>-3</sup> та  $1,73 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup> для повітря і водяної пари. Атоми металів появляються у газовій фазі при розпиленні розчину. У газовій фазі концентрації  $H_2O$ ,  $NO_2$ ,  $OH$ ,  $O$ ,  $O_3$  більші ніж для інших речовин, що вказує на велику активність оксидації у плазмі атмосферного тиску.

Метою роботи було вивчити фізико-хімічні характеристики тліючого розряду з рідинними електродами, які на даний час вивчені мало, особливо при застосуванні розчинів солей алюмінію у воді. Таким

чином, можливо виявити специфіку цих явищ, одержати інформацію для подальшого їх дослідження, керування та прикладних застосувань.

### Техніка та методика експерименту

Тліючий розряд запалювався у кюветі, виготовленій з оргскла, одним електродом служила голка з міді, а другим – поверхня розчину  $Al_2(SO_4)_3$ . Контрольні експерименти були проведені над поверхнею дистильованої води. Дослідження проводилися при відстані між металевим електродом і поверхнею розчину 8 мм, товщина шару водного розчину сірчаноокислого алюмінію становила 2 мм.

Для живлення розряду був використаний високовольтний випрямляч ( $U = 1-25$  кВ;  $I = 1-100$  мА). У праці [5] міститься детальний опис експериментальної установки. Геометричні розміри плазми були визначені на основі світлин розряду при різних значеннях струму розряду.

### Визначення концентрації електронів у плазмі тліючого розряду

При проходженні електричного струму через провідник сила струму ( $I$ ) пропорційна заряду який проходить через поперечний переріз провідника площею  $S$ :

$$dI = en_e v_{dr} dS, \quad (1)$$

де  $e$  – заряд електрона,  $n_e$  – концентрація електронів,  $v_{dr}$  – швидкість дрейфу носіїв заряду [6].

$$v_{dr} = \mu E. \quad (2)$$

де  $E$  - напруженість електричного поля,  $\mu$  - рухливість носіїв заряду:

$$\mu = (2el/mE)^{0.5}, \quad (3)$$

де  $l$  - довжина вільного пробігу,  $m$  - маса електрона. Таким чином можемо оцінити концентрацію електронів:

$$n_e = (dI/dS)(1/ev_{dr}). \quad (4)$$

Утворення заряджених частинок відбувається в основному у катодному шарі розряду, де концентрація заряджених частинок набуває максимального значення. Для іонізації молекул повітря за час вільного пробігу електрон повинен набувати енергії достатньої для відриву електрона від молекули азоту який складає 80 % повітря. Таким чином можлива оцінка напруженості електричного поля в катодній області:

$$E = E_i / eI. \quad (5)$$

тут  $E_i$  – енергія іонізації  $N_2$ . Визначивши незалежними вимірюваннями катодний спад напруги можна визначити розміри катодної області  $h_k = E/U_k$ . Згідно [7] у кожному газі при малих значеннях струму анодне падіння потенціалу співрозмірне із потенціалом іонізації та суттєво менше катодного  $U_a \ll U_k$ . Згідно експериментально визначених вольт-амперних характеристик було визначено катодне падіння потенціалу та спад напруги на розрядному проміжку:  $U = U_k + U_a + U_{ps}$ ,  $U_{ps}$  – спад напруги в позитивному стовпі. В області позитивного стовпа значення концентрації заряджених частинок буде мінімальним. Для оцінки напруженості електричного поля в позитивному стовпі скористаємося:

$$U_a \ll U_k, U_{ps} = U - U_k. \quad (6)$$

Відстань  $l$  для якої, ймовірність зіткнення при проходженні електрона через газ рівна одиниці, називається середньою довжиною вільного пробігу. Вона пов'язана з

ефективним перерізом зіткнення  $\sigma$  співвідношенням:

$$l = 1/(\sigma n_{N_2}) \quad (7)$$

та характеризує відстань, яку в середньому проходить електрон, перш ніж відбудеться його зіткнення з атомом газу. Знаючи, що згідно теорії зіткнень розмір катодного та анодного шару порядку  $10^{-6}$  м, то напруженість електричного поля в позитивному стовпі оцінимо як відношення  $(U - U_k)/h$ ,  $h$  - відстань між електродами.

Величини площі поперечного перерізу розряду в області катодної плями та позитивного стовпа були оцінені за допомогою світлин розряду.

### Параметри розряду

Для розрахунків параметрів плазми використані нормальні умови, які дають оцінки максимальних значень величини концентрації електронів, що стосуються біляпорогового режиму та пробую. Аналізуючи параметри утворення електровід'ємних часток їх утворення буде найефективнішим між приелектродними областями та позитивним стовпом.

На рис. 1 представлено залежність концентрації електронів від струму розряду для катода на основі дистильованої води.

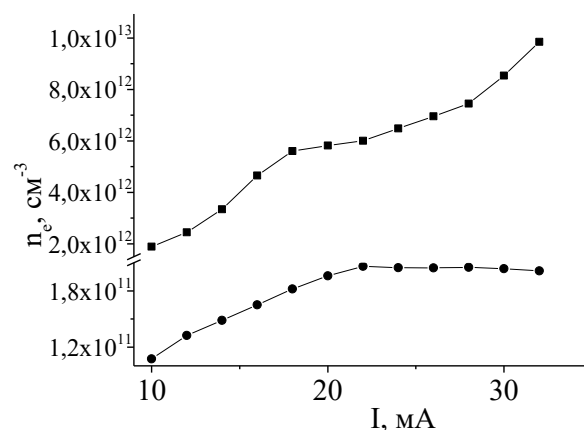


Рис. 1. Залежність концентрації електронів у позитивному стовпі (●) та катодній області (■) від струму розряду для катода на основі дистильованої води.

Значення концентрації електронів у позитивному стовпі складають  $1-2 \times 10^{11}$

$\text{cm}^{-3}$ , а для катодного шару  $2-9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  для катода на основі дистильованої води.

Концентрації хімічно-активних молекул та радикалів оцінені по інтенсивності випромінювання OH та NO за допомогою програми Spesair складають порядку  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . У випадку катода на основі 1% та 10% розчину  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$   $n_e = (1-4) \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  у позитивному стовпі та  $n_e = (3-10) \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  у катодному шарі. Такі дані представлені на рис. 2.

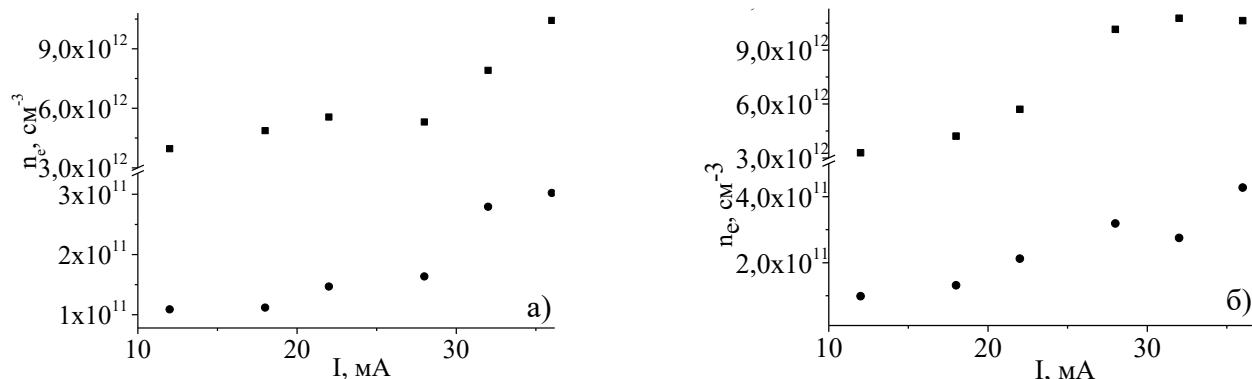


Рис. 2. Залежність концентрації електронів у позитивному стовпі (●) та катодній області (■) від струму розряду для катода на основі а) 1% розчину  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , б) 10% розчину  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

### Висновки

Детально досліджені процеси в тліючому розряді над поверхнею розчинів сульфату алюмінію: проведено чисельні розрахунки концентрації електронів у позитивному стовпі та катодній області розряду для катода на основі дистильованої води, 1% та 10% розчину  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

Значення концентрації електронів у позитивному стовпі складають  $(1-2) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , а для катодного шару  $(2-9) \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  для катода на основі дистильованої води та  $(1-4) \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  і

У літературі вказується на значення концентрації електронів в позитивному стовпі розряду  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  при струмах 40-100 мА [8]. Згідно праці [9] концентрація електронів у прикатодній області становила  $3,7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  (використовуючи  $U=515 \text{ В}$  і густину катодного струму  $j=0,5 \text{ А cm}^{-2}$ ), а в центральній частині розрядної плазми атмосферного тиску  $n_e=7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .

$(3-10) \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  для катода на основі 10% розчину  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Значення концентрації електронів у позитивному стовпі складало  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , а для катодного шару –  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .

Одержані результати можуть бути використані для вивчення фундаментальних закономірностей фізики процесів тліючого розряду з рідинним електродом при атмосферному тиску для виявлення можливості розробки джерел іонів, неканцерогенного випромінювання, сполук, наноструктур та плазми з керованими параметрами для плазмових технологічних процесів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Malik M. Gaffar A., Malik S. Water purification by electrical discharges // Plasma Sources Sci. Technol. – 2001. – №10. – P.82-91.
2. Choi J., Nielsch K., Reiche M. et al. Fabrication of monodomain alumina pore arrays with an interpore distance smaller than the lattice constant of the imprint stamp // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2003. – V. 21, № 2. – P. 763–766.
3. Plasma Chemistry and Catalysis in Gases and Liquids / Edited by Parvulescu V.I., Magureanu M., Lukes P. – Weinheim: Wiley, 2012. – 422 p.
4. Sirotkin N. A. Khlyustova A. V., Maximov A. I. Numerical simulation of

- gas-phase composition at glow discharge with electrolyte cathode // Proc. of the VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk, Belarus. – 2012. – P. 110-113.
5. Месарош Л.В., Шуайбов О.К., Чучман М.П. Дослідження тліючого розряду над поверхнею дистильованої води // Науковий вісник Ужгородського університету, серія Фізика. – 2012. – 32. – С. 82-88.
  6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 113-157 с.
  7. Энциклопедия низькотемпературної плазми // под ред В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2000. – Т. 2. – 633 с.
  8. Баринов Ю.А. Ю.А., Каплан В.Б, Школьник С.М. О возможности очистки воды от поверхностных загрязнений нефтепродуктами с помощью электрического разряда в открытой атмосфере // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, №.16. – С.26-32.
  9. Mezei P. Cserfalvi T. Electrolyte Cathode Atmospheric Glow Discharges for Direct Solution Analysis // Appl. Spectr. Rev. – 2007. – V.42. – P. 573-604.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2015

L.V. Mesarosh

Uzhgorod National University, Voloshin Str., 54, Uzhgorod, 88000

## INVESTIGATION OF THE CONCENTRATION OF ELECTRONS OF PLASMA OF GLOW-DISCHARGE ABOVE SURFACE OF AQUEOUS SOLUTION OF SULFATE OF ALUMINIUM

The glow discharge plasma with liquid cathode on basis of distilled water and an aqueous solution of  $Al_2(SO_4)_3$  has shown the change of concentration of electrons and their change with discharge current from 12 to 36 mA..

**Keywords:** glow discharge, aqueous solution of aluminium sulfate, distilled water, cathode spot, concentration of electrons.

Л.В. Месарош

Ужгородский национальный университет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОДНОГО РАСТВОРА СУЛЬФАТА АЛЮМИНИЯ

Для тлеющего разряда с жидкостным катодом на основе дистиллированной воды и водного раствора  $Al_2(SO_4)_3$  приведено изменение концентрации электронов с изменением тока разряда от 12 до 36 мА.

**Ключевые слова:** тлеющий разряд, водный раствор сульфата алюминия, дистиллированная вода, катодное пятно, концентрации электронов.