

УДК: 537.525 + 539.19

## Электрические характеристики тлеющего разряда в воздухе с электролитическим катодом основе сульфата меди купороса

А.К. Шуаибов, М.П. Чучман, Я.Ю. Козак

*Исследованы пространственные и электрические характеристики тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью раствора сульфата меди в дистиллированной воде. Расстояние от жидкостного катода варьировалось в диапазоне 1–10 мм при среднем токе разряда 5–36 мА. Содержание сульфата меди ( $\text{CuSO}_4$ ) изменялось от 1 до 20%.*

PACS: 52.80.He

*Ключевые слова:* тлеющий разряд, поверхность, электролит, раствор, сульфат меди, вольт-амперная характеристика, катодное падение потенциала, пространственные характеристики, синтез наночастиц.

### Введение

Тлеющий разряд в воздухе атмосферного давления с жидкими электродами находит все более широкое применение в системах очистки воды, напылении защитных покрытий, синтезе озона и наноструктур оксидов металлов, а также в ряде других плазменно-растворных технологий [1–3]. При использовании растворов сульфата меди в дистиллированной воде в качестве жидкого катода для тлеющего разряда в воздухе возможно образование наноструктур меди и оксидов меди, которые образуются в процессах электролиза в растворе и при инъекции активных частиц из плазмы тлеющего разряда через границу «плазма–раствор».

По сравнению с синтезом наночастиц при помощи импульсного разряда в дистиллированной воде, где металл поступает в плазму при эрозии электродов, использование тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью электролита не требует использования генераторов высоковольтных импульсов напряжения и систем поддержания постоянного межэлектродного расстояния [4]. Поэтому актуальной в настоящее время является задача всестороннего

исследования характеристик тлеющего разряда над поверхностью растворов медного купороса в воде. Электрические характеристики таких разрядов частично изучались в работах [5, 6], но систематические исследования, влияния содержания сульфата меди в растворах при небольших токах ( $I = 3–50$  мА) на величину катодного падения потенциала (КПП) отсутствуют. Для зажигания этого типа тлеющего разряда величина КПП является важной, поскольку она определяет энергию положительных ионов, бомбардирующих поверхность электролита [7, 8].

В настоящей статье приводятся результаты исследования пространственных и электрических характеристик тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления с катодом на основе раствора сульфата меди в дистиллированной воде.

### Техника и условия эксперимента

Тлеющий разряд атмосферного давления в воздухе зажигался над поверхностью электролита, который находился в кювете из оргстекла и имел объем, примерно, один литр. Анодом служила проволока из алюминия диаметром 2 мм. Расстояние между поверхностью электролита, который служил катодом, и металлическим анодом варьировалось в диапазоне 2–10 мм, а глубина погружения другого металлического электрода в раствор составляла 2 мм. Ток разряда изменялся в диапазоне 5–36 мА. Более детально схема экспериментального стенда и его основные характеристики приведены в работах [9, 10].

Тлеющий разряд в воздухе над поверхностью раствора сульфата меди в дистиллированной

Шуаибов Александр Камилевич, вед. научн. сотрудник.

Чучман Михаил Петрович, научный сотрудник.

Козак Ярина Юрьевна, аспирант.

Ужгородский национальный университет.

Украина, 88000, Ужгород, ул. Пидгирна, 46.

Тел.: (3122) 36187. E-mail: shuaibov@i.ua

jarynkad@ukr.net

Статья поступила в редакцию 25 января 2014 г.

© Шуаибов А.К., Чучман М.П., Козак Я.Ю., 2014

воде зажигался сначала как импульсно-периодический, но уже через несколько десятков секунд переходил в непрерывный режим горения, который характеризовался образованием яркого отрицательного катодного свечения и катодного пятна на поверхности раствора.

Спад напряжения на разрядном промежутке измерялся при помощи киловольтметра С-196, а ток разряда — с использованием миллиамперметра М 906.

На основе измеренных вольт-амперных характеристик (ВАХ) тлеющего разряда при разных расстояниях в системе «металлический анод—поверхность электролита»  $d$  путем экстраполяции зависимостей спада напряжения от величины  $d$  к нулю (при фиксированном токе тлеющего разряда), определялось катодное падение потенциала.

### Характеристики тлеющего разряда

На рис. 1 и 2 приведены фотографии тлеющего разряда над поверхностью электролита в воздухе атмосферного давления при разных межэлектродных расстояниях  $d$ , токах разряда и содержании соли  $\text{CuSO}_4$  в растворе (5 и 20%). Увеличение  $d$  (сверх 8 мм) приводило к неустойчивости зажигания тлеющего разряда, впрочем, как и для катода на основе дистиллированной воды [10].

Как видно из представленных фотографий, пространственные распределения интенсивности излучения сильно зависят от величины расстояния между металлическим анодом и поверхностью раствора, тока разряда и содержания соли в воде. При  $d = 7\text{--}8$  мм наиболее интенсивным было излучение разряда над поверхностью дистиллированной воды, что связано с большей величиной КПП для этого типа жидкого катода. При  $d = 1$  мм увеличение содержания соли в растворе приводило к росту объема разряда за счет уширения плазмообразования, а также интенсивно-

сти его свечения при токе 33 мА. При  $d = 7$  мм наиболее интенсивным было свечение разряда грушевидной формы при содержании соли, равном 20%, при токе 33 мА. При малом токе ( $I = 13$  мА) увеличение содержания соли в растворе приводило к переходу диффузного грушевидного свечения разряда в широкий диффузный канал неправильной цилиндрической формы (см. рис. 1.3 и рис. 2.3). Возможной причиной отличий пространственных распределений над поверхностью электролита и дистиллированной воды является процесс инъекции частиц растворителя в плазму тлеющего разряда.

ВАХ тлеющего разряда с электролитическим катодом приведены на рис. 3. Для тлеющего разряда при концентрации соли  $\text{CuSO}_4$  на уровне 5% увеличение расстояния между анодом и поверхностью электролита с 1 до 7 мм приводило к увеличению потенциала зажигания от  $\sim 300$  до  $\sim 1400$  В. Величина квазистационарного значения напряжения горения тлеющего разряда увеличивалась при этом с 200 до 900 В. При  $d = 5\text{--}7$  мм ВАХ имели вид, который характерен для поднормальной стадии тлеющего разряда низкого давления между металлическими электродами (рис. 2, а) [11].

Увеличение содержания соли в растворе имело следствием спад потенциалов зажигания при разных  $d$  и отклонению режима горения от нормального, что особенно заметно при  $d = 5\text{--}7$  мм. В последнем случае увеличение тока с 12 до 33 мА приводило к практически линейному спаду величины напряжения на промежутке и было наиболее выраженным при  $d = 7$  мм. Максимальный вклад мощности тлеющего разряда в плазму находился в пределах 25—35 Вт (при  $d = 7$  мм).

Зависимости катодного падения потенциала от тока тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью электролита и дистиллированной воды приведены на рис. 4. Максимальная величина КПП наблюдалась для катода

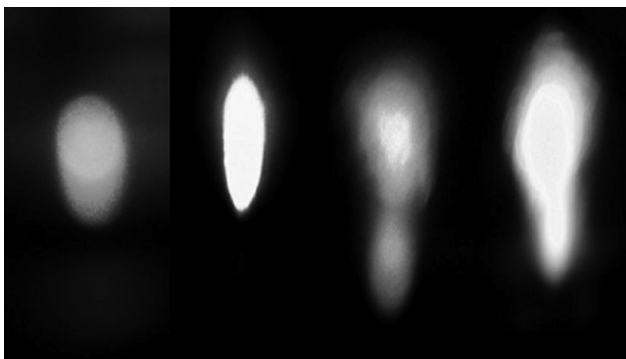


Рис. 1. Фотографии тлеющего разряда в воздухе над поверхностью электролитного катода при содержании соли  $\text{CuSO}_4\text{--}5\%$  в дистиллированной воде при межэлектродном расстоянии  $d = 1$  мм (1,2) и  $d = 7$  мм (3,4); величина тока: 13 мА (1,3) и 33 мА (2,4).

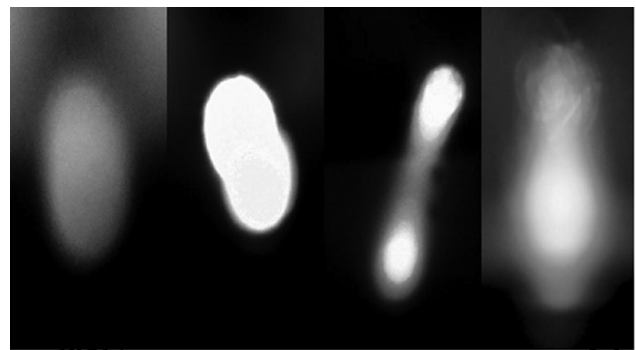


Рис. 2. Фотографии тлеющего разряда над поверхностью электролитного катода при содержании соли  $\text{CuSO}_4\text{--}20\%$  в дистиллированной воде при межэлектродном расстоянии  $d = 1$  мм (1,2) и  $d = 7$  мм (3,4); величина тока: 12 мА (1,3) и 33 мА (2,4).

на основе дистиллированной воды ( $U_K \approx 360$  В при токе разряда 17 мА), а при увеличении тока она уменьшалась до 320–330 В. Величина же КПП для разряда над поверхностью электролита со-

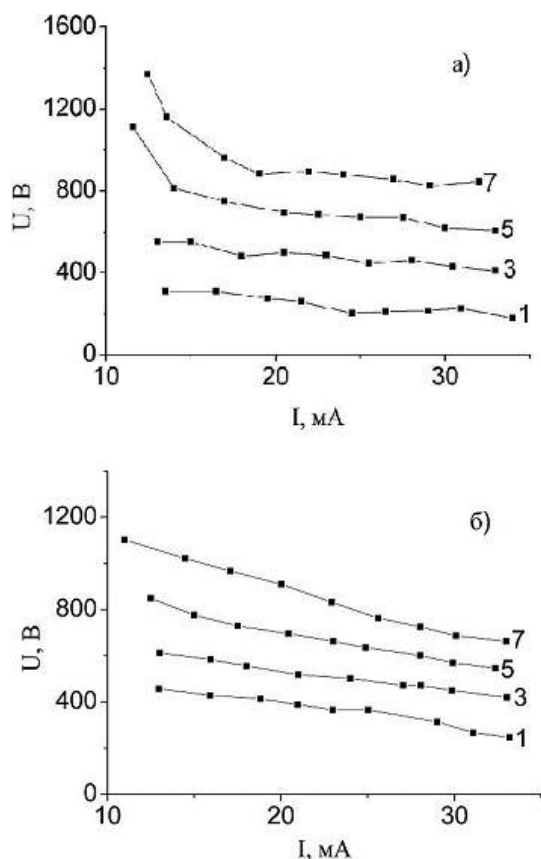


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда при разных межэлектродных расстояниях для: а) — электролитного катода при содержании  $\text{CuSO}_4$ —5%, при межэлектродном расстоянии  $d = 1, 3, 5, 7$  мм, б) —  $\text{CuSO}_4$ —20%, при межэлектродном расстоянии  $d = 1, 3, 5, 7$  мм.

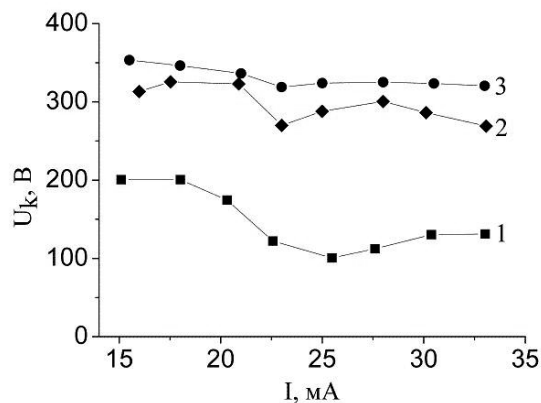


Рис. 4. Зависимость катодного падения потенциала в тлеющем разряде с электролитным и водяным катодом от разрядного тока при содержании  $\text{CuSO}_4$  в растворе: 5% (1), 20% (2), дистиллированная вода — (3).

ставляла 100–200 В (содержание  $\text{CuSO}_4$  — 5%) и 260–325 В (содержание  $\text{CuSO}_4$  — 20%). Для КПП разряда над поверхностью электролита наблюдался характерный минимум при токах 23–25 мА.

После горения тлеющего разряда над поверхностью электролита в течение 1–3 часа цвет разряда с синего переходил в светло-зеленый и становился непрозрачным, что может быть обусловлено образованием микро- и наночастиц меди и оксида меди, характеристики которых будут предметом дальнейших исследований.

### Заключение

Исследование тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью раствора сульфата меди в дистиллированной воде (концентрация  $\text{CuSO}_4$  может составлять 10–20%) при межэлектродном расстоянии меньше 8 мм и токах разряда 20–35 мА показало возможность образования микро- и наночастиц на основе продуктов деструкции сульфата меди, которые выпадают в коллоидный раствор. Заметим, что реактор не требует принудительного охлаждения и может устойчиво работать в течение нескольких часов, а при пополнении запаса рабочего раствора — десятки часов.

### Литература

1. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 2. под ред. Фортова В.Е. — М.: Наука. 2000.
2. Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш., Гайсин Ф.М. Струйный многоканальный разряд с электролитическими электродами в процессах обработки твердых тел. — К.: Изд. Каз. гос. тех. университета. 2006.
3. Richmonds C., Sankaran R. M. // Appl. Phys.Lett. 2008. V.93. P. 132501.
4. Бураков В. С., Савастенко Н. А., Тарасенко Н. В., Невар Е. А. // ЖПС. 2008. Т. 75. № 1. С.111.
5. Жилинский В.В., Дроздович В.Б., Иванова Н.П., Жданок С.А. // Изв. нац. АН Беларуси. Сер. хим. наук. 2010. № 1. С. 12.
6. Валиев Р.И., Шакиров Б.Ю. // Вектор науки ТГУ. 2012. № 1 (19). С.54.
7. Поляков О.Б., Бадалян А.М., Бахтурова Л.Ф. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. www.chemphys.edu.ru/pdf/2007-01-16-001.pdf.
8. Поляков О.Б., Бадалян А.М., Бахтурова Л.Ф. // ХВЭ. 2007. Т. 14. № 6. С.534.
9. Месарош Л.В., Шуайбов А.К., Чучман М.П. // Науковий Вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2012. Вип.32. С.82.
10. Шуайбов А.К., Чучман М.П., Месарош Л.В., Грабовая И.А. // ПТЭ. 2013. № 6. С.90.
11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. — М.: Наука. 1987.

## Electrical characteristics of glow discharge with electrolytic cathode based on copper sulphate in the air

A. K. Shuaibov, M. P. Chuchman, and Ya. Yu. Kozak

Uzhgorod National University  
46 Pidgirna str., Uzhgorod, 88000, Ukraine  
E-mail: shuaibov@i.ua; jarynkad@ukr.net  
Received January 25, 2014

*The spatial and electrical characteristics of the glow discharge in air at atmospheric pressure above the surface of the copper sulphate solution in distilled water. Distance from liquid cathode varied from 1–10 mm at an average discharge current of 5–36 mA. The content of copper sulfate (CuSO<sub>4</sub>) was varied from 1 to 20%.*

PACS: 52.80.He

*Keywords:* glow discharge, surface, electrolyte, copper sulphate solution, current-voltage characteristic, cathode potential drop, spatial characteristics, synthesis, nanoparticles.

### References

1. F. M. Gaisin and E. N. Son, *Encyclopedia of Low-Temperature Plasma, Vol. 2*. Ed. by V. E. Fortov (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
2. A. F. Gaisin, I. Sh. Ablullin, F. M. Gaisin, *Jet-Stream Multichannel Discharge with Electrolytic Electrodes in Processes of Solid State Treatment* (Kazan State Technical University, Kazan, 2006) [in Russian].
3. C. Richmonds and R. M. Sankaran, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 132501 (2008).
4. V. S. Burakov, N. A. Savastenko, et al., *J. Appl. Spectr.* **75** (1), 111 (2008).
5. V. V. Zhilinsky, V. E. Drozdovich, N. P. Ivanova, et al., *Izv. Nats. AN Belarus, Ser. Khim. Nauk.* No. 1, 12 (2010).
6. R. I. Valiev and B. Yu. Shakirov, *Vekt. Nauki TGU*, No. 1, 54 (2012).
7. O. B. Polyakov, A. M. Badalyan, and L. F. Bakhturova, *Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics*. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2007-01-16-001.pdf>.
8. O. B. Polyakov, A. M. Badalyan, and L. F. Bakhturova, *High Energy Chemistry*. **14**, 534 (2007).
9. L. V. Mesarosh, A. K. Shuaibov, and M. P. Chuchman, *Nauk. Visn. Uzhgorod Univ. Ser. Fiz.*, No. 32, 82 (2012).
10. A. K. Shuaibov, M. P. Chuchman, L. V. Mesarosh, et al., *Instrum. Exp. Tech.*, No. 6, 90 (2013).
11. Yu. P. Raizer, *Physics of Gas Discharge* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].