

УДК 537.523.3

PACS 52.80.–s, 51.50.+v, 52.80.Tn, 52.90.+z, 52.80.Wq,  
52.80.Mg, 79.60.Jv

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.112-119

І.В. Шевера<sup>1</sup>, В.В. Данило<sup>1</sup>, З.Т. Гомокі<sup>1</sup>, О.Й. Миня<sup>1</sup>, О.К. Шуаїбов<sup>1</sup>,  
В.І. Чигінь<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54  
e-mail-адреса igor.shevera@uzhnu.edu.ua

<sup>2</sup>Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, 79012,  
м. Львів, вул. Героїв Майдану, 32

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОСТРУМОВОГО НАНОСЕКУНДНОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ НАД ПОВЕРХНЕЮ РОЗЧИНУ СУЛЬФАТУ МІДІ В ДИСТИЛЬОВАНІЙ ВОДІ

Досліджено просторові, спектральні і електричні характеристики високострумового наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску на поверхню розчинів сульфату міді в дистильованій воді. В спектрі випромінювання плазми спостерігалось випромінювання другої позитивної системи молекули азоту, радикалів гідроксила та продуктів дисоціації молекул сульфату міді. Імпульс струму амплітудою 150 А, тривалістю 60 нс формувався при імпульсній напрузі на електродах амплітудою біля 50 кВ. Пікове значення електричної потужності розряду складало ~ 2 МВт, а енергетичний внесок в плазму ~ 80 мДж.

**Ключові слова:** наносекундний розряд, вода, повітря, розчин сульфату міді, наноструктури.

### Вступ.

Розряд з рідинним неметалевим катодом (вода, розчини солей у воді) інтенсивно досліджується з точки зору встановлення характеристик і параметрів плазми, а також механізму запалювання цього розряду і застосування в різних рідинно-плазмових технологіях [1-3]. На даний час відсутня повна і несутеречлива картина фізичних процесів в подібних розрядах, хоча вони уже широко використовуються. Так, в [4] виявлена антимікробна дія цього типу розряду на різні тест-культури мікроорганізмів.

Проте, живлення розряду від джерела високої напруги постійного струму накладає обмеження на амплітуду додатних стримерів і їх довжину, тому перехід до імпульсного режиму запалювання в системі електродів «багатополюсовий анод – плоский електролітний катод» [5] і розряд по

поверхні електроліту [6] дозволили досить ефективно очищувати воду від домішок фреона.

Іншим перспективним застосуванням імпульсних розрядів з рідинними електродами є синтез наноструктур металів або їх оксидів. Так, в [7] іскрові розряди з електролітним катодом були використані для синтезу наноструктур міді і нікелю при обробці розчинів солей  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{NiSO}_4$  плазмою. Іскровий розряд запалювали в проміжку «голка-поверхня електроліту» при віддалі 2-4 мм і робочій напрузі  $U = 6-8$  кВ внаслідок комутації конденсатора ємністю  $(1,02-75) \cdot 10^{-10}$  Ф на міжелектродний проміжок. В цьому реакторі були синтезовані магнітні наноструктури нікелю з розмірами ~  $50 \times 50 \times 200$  нм і немагнітні наноструктури міді з розмірами  $(25-586)$  нм. Для пришвидшення синтезу наноструктур і збільшення виходу наноматеріалів в макроскопічній кількості необхідно збільшу-

вати об'єм плазми та імпульсний внесок енергії в плазму.

Метою даної роботи є розробка і дослідження характеристик плазмохімічного реактора з наносекундним розрядом в системі «металеві леза-поверхня електроліту» у повітрі атмосферного тиску, який може бути використаний для синтезу колоїдного розчину на основі наноструктур міді.

### Техніка і умови експерименту

Для дослідження характеристик наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску над поверхнею розчинів мідного купоросу в дистильованій воді використовувалась розрядна комірка з системою електродів: верхній електрод – система металевих лез і нижній електрод у вигляді металевої пластини, розміщеної в розчині. Схема і описання системи наведені у статті [8]. Для дослідження просторових, електричних і оптичних характеристик наносекундного розряду над поверхнею електроліту на основі мідного купоросу, використовувалась експериментальна установка, описана у праці [9].

Для оцінки енергетичного внеску в плазму реєструвались осцилограми струму і напруги на електродах за допомогою шес-

тиканального осцилографа 6ЛОР-04. Ці осцилограми графічно перемножувались, що дозволяло визначити імпульсний енергетичний внесок в плазму в залежності від часу. Інтегрування за часом імпульсного енергетичного внеску дозволяло визначити енергетичний внесок в плазму протягом одного імпульсу.

При проведенні експериментальних досліджень використовувались розчини дистильованої води з вмістом мідного купоросу ( $\text{CuSO}_4$ ) 1-20 %. Експерименти проводились при віддаль між поверхнею розчинів і кінчиками лез 4, 7 і 10 мм. Товщина шару розчинів над зануреним металевим електродом складала 4 мм.

Свічення наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску над поверхнею розчинів мідного купоросу мало синьо-фіолетовий відтінок і заповнювало майже весь розрядний проміжок (рис.1). Це свічення значно відрізнялось від свічення подібних розрядів над поверхнею дистильованої води без домішок солі мідного купоросу, що зумовлено внесенням в плазму продуктів електротичної дисоціації солі в плазму.



Рис.1. Свічення імпульсного розряду наносекундної тривалості над поверхнею 10% водного розчину мідного купоросу при міжелектродній віддалі 7 мм та товщині шару рідини 4 мм.

Після роботи розрядного пристрою на протязі 2-3 годин розчин змінював колір із синього на зелений (рис.2), що свідчить про трансформацію розчину на основі продуктів електролітичної дисоціації мід-

ного купоросу в колоїдний розчин з наноструктур оксидів міді. Максимум випромінювання плазменного резонансу наноструктур оксидів міді знаходиться в зеленій області довжин хвиль.

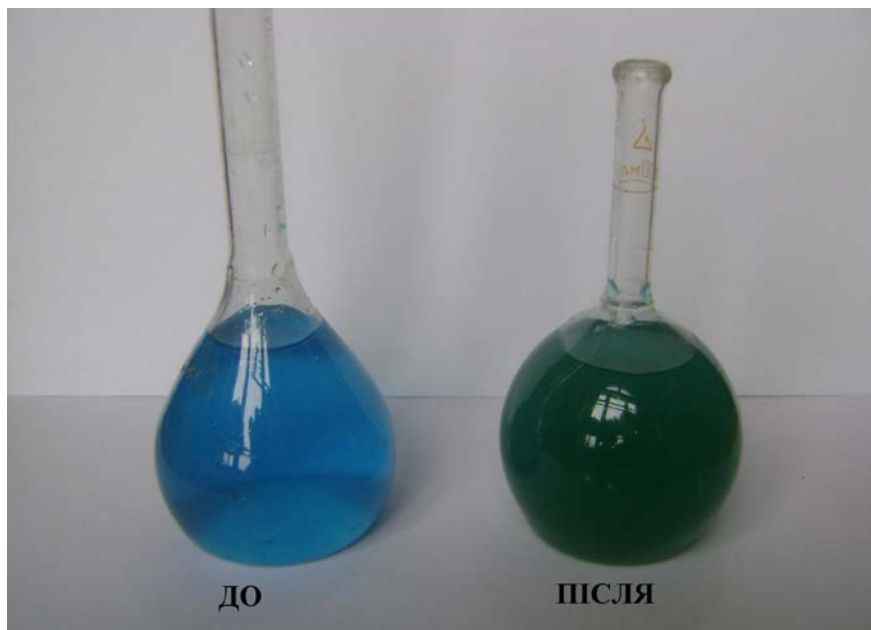


Рис.2. Вигляд розчину мідного купоросу до і після обробки поверхні електроліту сильнострумиви наносекундним розрядом.

В експериментах з розчином солі  $\text{CuSO}_4$  на нижній електрод – площину випадав осад біло-сірого кольору (в літературі на аналогічному розчині описано осідання наноструктур оксиду міді та закису міді).

На рис.3. наведено осцилограми напруги, струму та часову залежність електричної імпульсної потужності, яка вноситься в розряд.

Пікове значення напруги складало близько 50 кВ, струму - 75 А. Максимальне значення електричної імпульсної потужності наносекундного розряду було рівним близько 2 МВт, а енергія, що вносилась в плазму розряду складала  $\sim 78$  мДж.

Імпульс напруги складався з двох ділянок: додатної та від'ємної. Амплітуда першого імпульсу напруги визначається початковим опором розрядного проміжку, який складається з шару повітря та шару рідини. Цей шар рідини виступав як баластний опір, що обмежував різке наростання струму, яке в свою чергу впливав поведінку розряду.

В спектрі випромінювання наносекундного розряду над поверхнею дистильо-

ваної води, при міжелектродній віддалі 7 мм та товщині шару води - 4 мм домінувало випромінювання другої позитивної системи молекули азоту  $\text{N}_2$  (В-С) та X-A смуг радикала гідроксилу (ОН). Наявність у випромінюванні (в спектральному діапазоні 300-400 нм) лише смуг молекули азоту та продуктів дисоціації молекули води зумовлено тим, що оптичні характеристики даного розряду є близькими до відповідних характеристик однобар'єрного розряду в повітрі (де молекули азоту мають найбільш низько розміщені збуджені електронні стани), яке збагачене парою води внаслідок її нагрівання плазмою.

Виявити в спектрах випромінювання плазми і збуджені продукти розпаду молекули солі  $\text{CuSO}_4$  було можливим лише при концентрації солі в розчині, більшій 10 %. Так, в спектрі випромінювання наносекундного розряду над поверхнею 20 % розчину солі  $\text{CuSO}_4$  в дистильованій воді (рис. 4) спостерігалось випромінювання молекул  $\text{N}_2$ , радикалів NO, та атомів Cu, N, S. Результати ідентифікації спектральних ліній та смуг в спектрі (рис.4) наведені в таблиці.

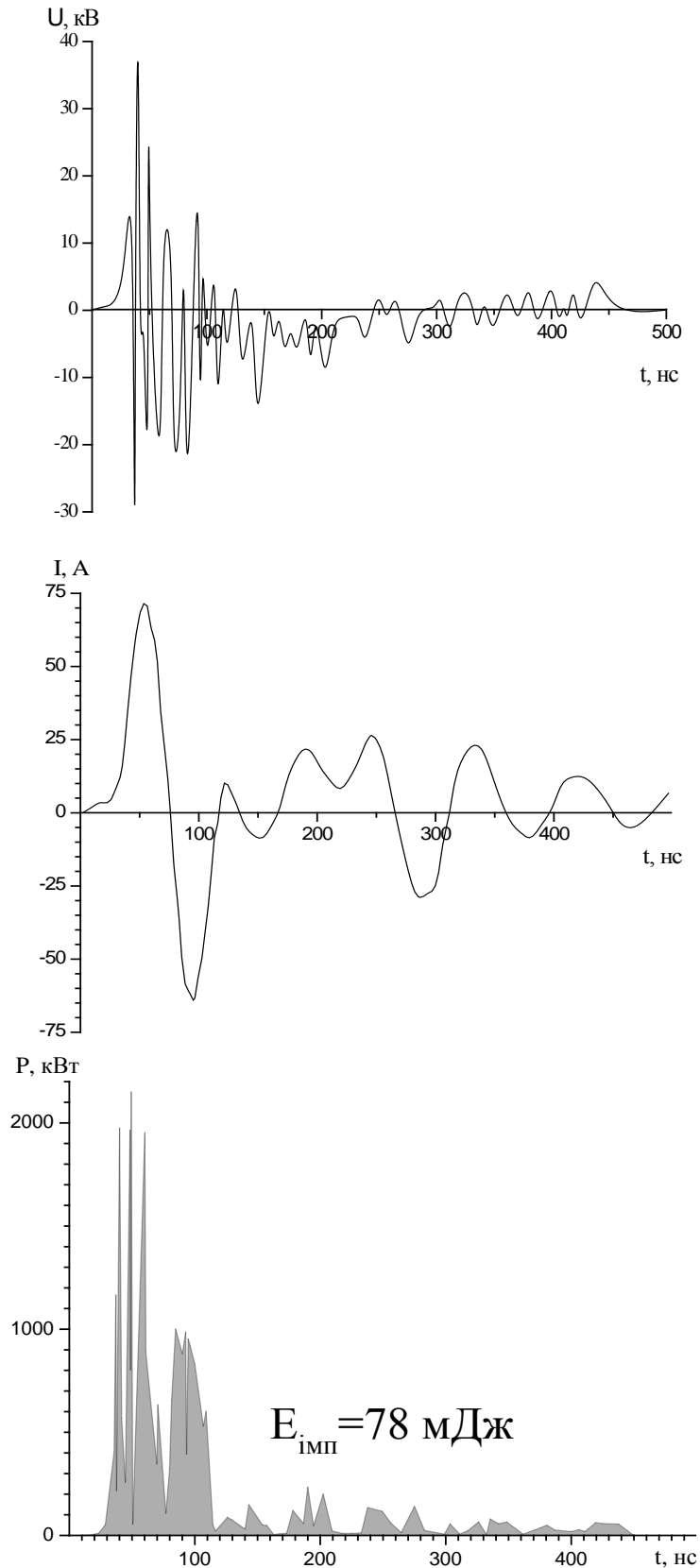


Рис.3. Осцилограми напруги на електродах, струму та електричної потужності наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску на поверхню 10% розчину мідного купоросу в дистильованій воді ( $U_{\text{зар}} = 13 \text{ кВ}$ ,  $f = 80 \text{ Гц}$ ).

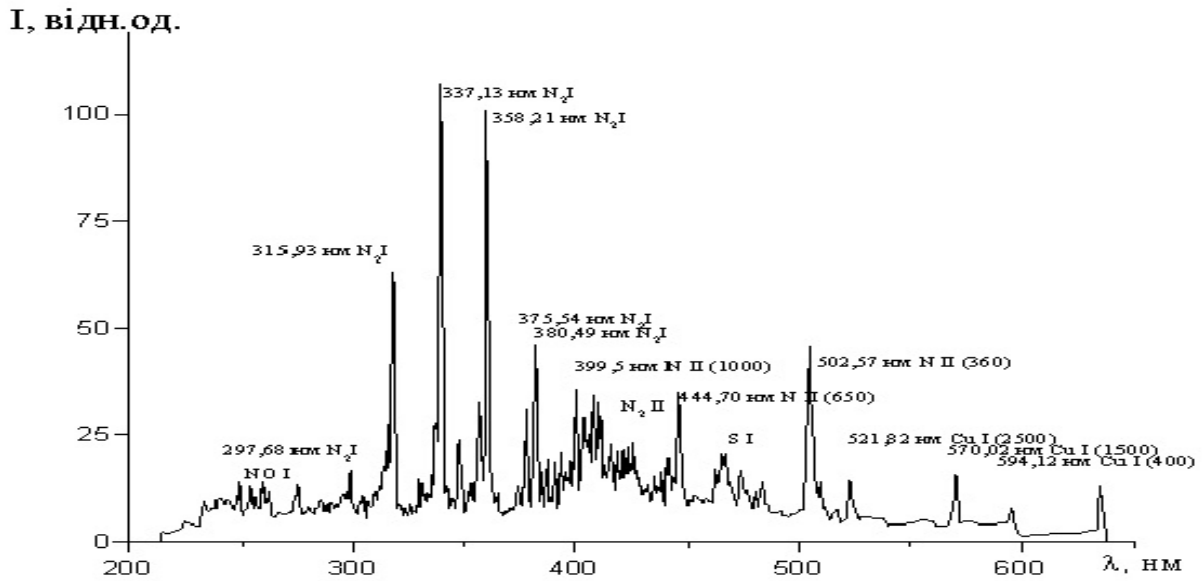


Рис.4. Спектр випромінювання наносекундного розряду над поверхнею 20 % розчину  $\text{CuSO}_4$ , при міжелектродній віддалі 7 мм, товщині шару розчину над зануреним в розчин електродом 4 мм,  $f=80$  Гц і  $U_{\text{зар}}=13$  кВ.

**Таблиця.**

Результати ідентифікації спектру, наведеного на рис.4.

|                        |
|------------------------|
| ~200-230 нм NO         |
| 297,68 нм $\text{N}_2$ |
| 315,93 нм $\text{N}_2$ |
| 337,13 нм $\text{N}_2$ |
| 358,21 нм $\text{N}_2$ |
| 375,54 нм $\text{N}_2$ |
| 380,49 нм $\text{N}_2$ |
| 399,5 нм NII           |
| 444,7 нм NII           |
| ~450-490 нм S I        |
| 502,57 нм NII          |
| 521,82 нм Cu I         |
| 570,02 нм Cu I         |
| 594,12 нм Cu I         |

**Висновки**

Дослідження характеристик наносекундного розряду над поверхнею розчинів

розчин сульфату міді виявило, що при вмісті в розчині солі 1-20% розряд запалюється у вигляді однорідного набору тонких плазмових листів, прив'язаних до вістря лез; такий вигляд розряду може бути зумовлений дією передіонізації від пучка втікаючих електронів з енергією 10-50 кеВ, супутнім йому рентгенівським випромінюванням та наявністю в розрядному проміжку домішок пари води і продуктів дисоціації солі, що легко іонізуються; імпульс напруги мав амплітуду ~50 кВ; амплітуда струму досягала 70 А при тривалості переднього фронту ~ 20 нс і повній тривалості ~ 100 нс, що забезпечувало максимальне значення імпульсної електричної потужності розряду в основній частині імпульсів напруги і струму на рівні 2 МВт, а енергетичний внесок за імпульс складав ~ 78 мДж; дослідження спектрів випромінювання наносекундного розряду виявило, що в УФ ділянці спектру переважає випромінювання другої позитивної системи молекул азоту, радикалів OH та окису азоту, а у видимій ділянці спектру реєструвались окремі спектральні лінії атомів та іонів азоту, міді і сірки; в експериментах синтезовано колоїдні розчини наноструктур оксидів міді.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гайсин Ф. М. Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами / Ф. М. Гайсин, Э. Е. Сон. – Свердловск: Издательство Уральского университета. – 1989. – С. 432 с.
2. Шуаибов А. К. Характеристики тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью воды / А. К. Шуаибов, М. П. Чучман, Л. В. Месарош. // Журнал технической физики. – 2014. – №6. – С. 60–64.
3. Dc excited glow discharges in atmospheric pressure air in pin-to-water electrode systems / [P. Bruggeman, J. Liu, J. Degroote та ін.]. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – №21. – С. 11.
4. Антимикробное действие разряда с жидким катодом на электродную жидкость / [Ю. А. Баринов, И. Л. Кузикова, С. В. Зиновьева та ін.]. // Письма в ЖТФ. – 2015. – №17. – С. 68–75.
5. Божко И. В. Коронный разряд на поверхность электропроводящей жидкости и его использование для обработки воды / И. В. Божко, Н. И. Фальковский. // Техн. электродинамика. – 2007. – №2. – С. 9–14.
6. Молчанова И. В. Изучение воздействия импульсного поверхностного разряда на состав воды при ее очистке / И. В. Молчанова, А. С. Цыбульский. // Научные труды Российского государственного технического университета им. К.Э. Циолковского (МАТИ). – 2010. – №17. – С. 414–419.
7. Получение металлических наночастиц из водных растворов в плазме искрового разряда / А. М. Орлов, И. О. Явтушенко, Д. С. Боднарский, Н. В. Уфаркина. // Журнал технической физики. – 2013. – №9. – С. 24–30.
8. Характеристики наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления с жидким электролитическим электродом / А. К. Шуаибов, И. В. Шевера, Я. Ю. Козак, Г. В. Кентеш. // Журнал технической физики. – 2014. – №6. – С. 143–146.
9. Дослідження характеристик імпульсного розряду над поверхнею водного розчину хлористого цинку / [В. В. Данило, І. В. Шевера, О. Й. Миня та ін.]. // Вісник Ужгородського університету. Фізика. – 2016. – №39. – С. 100–105.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2017

И.В. Шевера<sup>1</sup>, В.В. Данило<sup>1</sup>, З.Т. Гомоки<sup>1</sup>, А.И. Миня<sup>1</sup>, А.К. Шуаибов<sup>1</sup>, В.И. Чигинь<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ужгородский национальный университет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000, Украина, e-mail: igor.shevera@uzhnu.edu.ua

<sup>2</sup>Национальная академия сухопутных войск имени гетмана Петра Сагайдачного, г. Львов, 79000, ул. Героев Майдана, 32

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ РАСТВОРОВ СУЛЬФАТА МЕДИ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ

Исследованы пространственные, спектральные и электрические характеристики сильноточного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления на поверхность растворов сульфата меди в дистиллированной воде. В спектре излучения плазмы наблюдалось излучение второй позитивной системы моле-

кулы азота, радикалов гидроксила и продуктов диссоциации молекулы сульфата меди. Импульс тока амплитудой 150 А, длительностью 60 нс формировался при импульсном напряжении на электродах амплитудой примерно 50 кВ. Пиковое значение электрической мощности разряда составляло ~ 2 МВт, а энерговыход в плазму ~ 80 мДж.

**Ключевые слова:** наносекундный разряд, вода, воздух, раствор сульфата меди, наноструктуры

PACS 52.80.-s, 51.50.+v, 52.80.Tn, 52.90.+z, 52.80.Wq, 52.80.Mg, 79.60.Jv

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.112-119

I.V. Shevera<sup>1</sup>, V.V. Danylo<sup>1</sup>, Z.T. Homoki<sup>1</sup>, O.Y. Minya<sup>1</sup>, O.K. Shuaibov<sup>1</sup>, V.I. Chyhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

<sup>2</sup>Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, 32, Heroes of Maidan street, Lviv, Ukraine, 79012

## CHARACTERISTICS OF HIGH CURRENT NANOSECOND DISCHARGE IN THE AIR ABOVE SURFACE THE COPPER SULFATE SOLUTION IN DISTILLED WATER

**Introduction.** The discharges with liquid electrodes have received an extensive development in modern water treatment systems, at drawing various coatings, in synthesis of ozone and metal nanostructures. High current nanosecond discharges with the liquid electrode are the least studied. This hinders understanding of physics processes and optimize their various applications.

**Purpose.** The purpose of this work is investigation of characteristics of the reactor with high current nanosecond discharge in the "metal blades – electrolyte surface" system in air of atmospheric pressure, which can be used for synthesis of colloidal solution based on copper nanostructures.

**Methods.** In the work the optical-spectroscopic method of investigation of the discharge plasma with a high time resolution has been used.

**Results.** The results of investigation of electrical and optical characteristics of the high current nanosecond discharge on the surface of copper sulfate solution (1-20%) in distilled water are presented. The discharge electrical peak power is order of 2 MW, and the energy input in plasma is about 80 mJ. In the plasma emission spectrum the bands of nitrogen molecules and molecular degradation products of copper sulfate are registered. The influence of plasma on the solution causes to its color change from blue to green, indicating the copper nanostructure formation.

**Conclusion.** The experiments have revealed suitability of the developed device for the synthesis of copper nanostructures in the colloidal solution based on the water and copper sulfate. Its have established the basic conditions for sustainable ignition of the discharge in air of atmospheric pressure.

**Keywords:** nanosecond discharge water, air, copper sulfate solution, nanostructures.

PACS NUMBER: 52.80.-s, 51.50.+v, 52.80.Tn, 52.90.+z, 52.80.Wq, 52.80.Mg, 79.60.Jv

## REFERENCES

1. Gaysin, M.F., Son, E.E. (1989) “Electro-physical processes in discharges with solid and liquid electrodes” [“Elektrofizicheskiye protsessy v razryadakh s tverdymi i zhidkimi elektrodami”], Sverdlovsk: Ed. Ural University [Sverdlovsk: Izd. Ural un-ta], pp. 432.
2. Shuaibov, A.K., Chuchman, M.P., Mesarosh, L.V. (2014) “Characteristics of a glow discharge in air at atmospheric pressure above the water surface” [“Kharakteristiki tleyushchego razryada v vozdukhne atmosfernogo davleniya nad poverkhnost'yu vody”], Journal of Technical Physics [Zhurnal tehnikeskoy fiziki], V.84, No.6 pp.60-64.
3. Bruggerman, P., Liu, J., Degroote, J., Kong, M.G., (2008) “Vierendeels, J., and Leys, C. DC excited glow discharges in atmospheric pressure air in pin-to-water electrode systems”, J. Phys. D: V.41, pp. 11.
4. Barinov, Yu.V., Kuzikov, I.L., Zinoveva, S.V., Shkolnik, S.M., Medvedeva, N.G. (2015) “Antimicrobial action of discharge with liquid cathode on electrode fluid” [“Antimikrobnoye deystviye razryada s zhidkim katodom na elektrodnuyu zhidkost”], Technical Physics Letters [Pisma v ZhTF] V. 41, No 17, pp. 68-75.
5. Bozhko, I.V., Fal'kovskiy, N.I. (2007) “Corona discharge on the surface of an electroconductive liquid and its use for water treatment” [“Koronnyy razryad na poverkhnost' elektroprovodyashchey zhidkosti i yego ispol'zovaniye dlya obrabotki vody”] Technical electrodynamics [Tehn. elektrodynamika] No 2, pp. 9-14.
6. Molchanova, I.V., Tsybul'skiy, A.S. (2010) “Study of the effect of a pulsed surface discharge on the composition of water during its purification” [“Izucheniye vozdeystviya impul'snogo poverkhnostnogo razryada na sostav vody pri yeye ochistke”] Scientific works of the Russian State Technical University named after. K.E. Tsiolkovsky [Nauchnyie trudyi Rosiyskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. K.E. Tsiolkovskogo], No 17, pp. 414-419.
7. Orlov, A.M., Yavtushenko, I.O., Bodnarskiy, D.S., Ufarkina, N.V. (2013) “Obtaining of metallic particles from water solutions in a plasma of spark discharges” [“Polucheniye metallicheskih nanochastits iz vodnykh rastvorov v plazme iskrovogo razryada”] Journal of Technical Physics [Zhurnal tehnikeskoy fiziki], V.83, No 9, pp. 24-30.
8. Shuaibov, A.K., Shevera, I.V., Ya.Yu., Kentesh, G.V., (2014) “Characteristics of nanosecond discharge in atmospheric pressure air with liquid electrolytic electrode” [“Kharakteristiki nanosekundnogo razryada v vozdukhne atmosfernogo davleniya s zhidkim elektroliticheskim elektrodom”] Journal of Technical Physics [Zhurnal tehnikeskoy fiziki], V.84, No 6, pp.143-146.
9. Danilo, V.V., Shevera, I.V., Minya, O.Y., Homoki, Z.T., Shuaibov, O.K. (2016) “Investigation of characteristics of pulse discharge about surface water solution of zinc chloride” [“Doslidzhennya kharakterystyk impul'snoho rozryadu nad poverkhnuyu vodnoho rozchynu khlorystoho tsynku”] Scientific herald of Uzhgorod University. Series Physics [Naukovyy visnyk Uzhhorods'koho universytetu. Seriya Fyzyka] No 39, pp.100-105.