

УДК 533.9; 537.52

О.А.Недибалюк

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60,  
Київ, 01033

e-mail: oanedybaliuk@gmail.com

## ПЛАЗМОВО-РІДИННА СИСТЕМА ЗІ ЗВОРОТНО-ВИХРОВИМ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ ТИПУ „ТОРНАДО” З „РІДКИМ” ЕЛЕКТРОДОМ

Досліджено плазмово-рідинну систему зі зворотно-вихровим потоком повітря типу „торнадо” з „рідким” електродом (вода). За допомогою відеокамери Nikon L100 досліджено процес горіння розряду та електролізу води. Виміряні вольт-амперні характеристики даного розряду для різних режимів роботи. Для дослідження плазми використовувалась емісійна спектроскопія. За відносними інтенсивностями двох спектральних ліній атома водню ( $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ) визначено електронну температуру та її розподіл вздовж плазмового факела. Визначено коливну та обертову температури.

**Ключові слова:** плазмово-рідинна система, розряд, „рідкий” електрод, зворотно-вихровий потік, плазмовий факел.

### Вступ

Для плазмово-хімічних технологій важливим показником є їх енергетична ефективність.

Проблема енергоефективності плазмово-хімічних технологій пов'язана з тим, що для генерації плазми необхідна найдорожча енергія – електрична. На сучасних теплових електростанціях для виготовлення однієї одиниці електричної енергії необхідно затратити три одиниці теплової енергії. Тому, необхідно вбудовувати плазмові системи в традиційні хімічні технології. Плазму потрібно ефективно інjektувати в реакційну камеру. При цьому, необхідно, за допомогою плазми керувати хімічними процесами, використовуючи її лише як каталізатор.

Однак окрім енергоефективності існує проблема витрат металевих електродів, які обмежують ресурс роботи плазмових систем. Можливим вирішенням цієї проблеми може бути використання плазмово-рідинних систем зі зворотно-вихровим потоком повітря типу „торнадо” з „рідким” електродом, де рідиною є вода. В цьому випадку витрати „рідкого” електроду також відбуватимуться, але ці витрати можна компенсувати підтримуючи її

рівень за допомогою шприцевого або перистальтичного насосу. До того ж в результаті активації води утворюватимуться радикали O, H, OH, які значно пришвидшать хімічні реакції.

### Експериментальна установка та методика експерименту

Схематичне зображення експериментальної установки представлено на рис. 1. В її основі лежить циліндрична кварцова камера (1) діаметром 90 мм. Зверху (2) і знизу (3) вона герметично закрита металевими фланцями. Камера заповнена рідиною (4), рівень якої крізь отвір (5) підтримувався за допомогою шприцевого насосу. Напруга подавалася між верхнім фланцем (2), який по центру містить мідну втулку діаметром 20 мм, та нижнім фланцем (3), який був виготовлений з нержавіючої сталі та контактував з рідиною (4), за допомогою джерела живлення „ДЖ” постійного струму, яке забезпечувало напругу до 7 кВ. Розряд горів між поверхнею рідини (4) та верхнім фланцем (2). Газ крізь отвір (6) вводився всередину фланця (2). Всередині фланця потік газу змінював напрямок на 90° градусів і вводився по дотичній в канал (7). В колоподібному каналі (7) газ

закручувався. Обертаючись, газ (8) опускався на поверхню рідини і рухався до центру її поверхні, де крізь отвір (9) діаметром 2 мм і довжиною 6 мм в мідній втулці (10), потрапляв в реакційну камеру (12), утворюючи плазмовий факел (11). Реакційна камера (12) була виготовлена з кварцу для того, щоб можна було дослідити плазмовий факел.

Загальний тиск складається зі статичного та динамічного. Біля отвору (9) швидкість потоку досягала максимального значення, тому в центрі газового прошарку утворювалася область нижчого тиску у порівнянні із периферією.

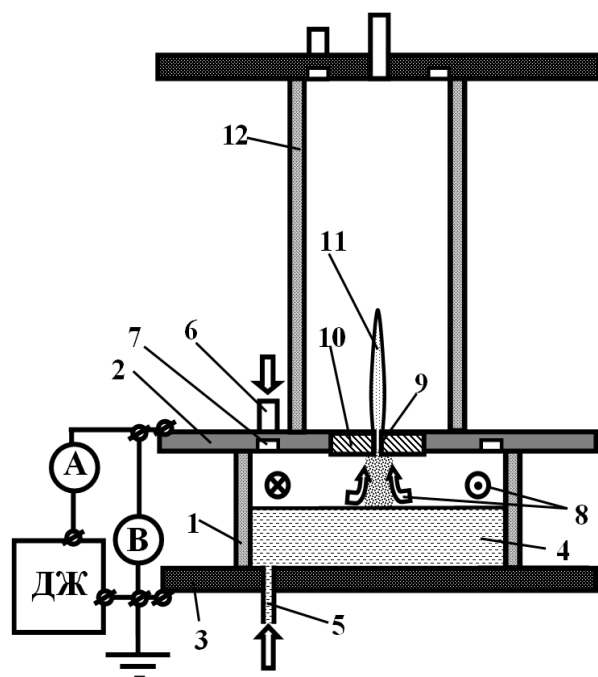


Рис. 1. Схематичне зображення плазмово-рідинної системи зі зворотно-вихровим потоком повітря типу „торнадо” з „рідким” електродом: 1, 12 – кварцові циліндри; 2, 3 – металеві фланці; 4 – рідина; 5 – отвір для подачі рідини; 6 – отвір для подачі повітря; 7 – колоподібний канал; 8 – потік газу; 9 – отвір у втулці; 10 – мідна втулка; 11 – плазмовий факел.

Розглядалося два режими роботи: „рідкий” катод (РК), коли на нижній фланець (3), який контактував з рідиною подавався „-”, а на верхній (2) фланець „+”; та „рідкий” анод (РА), коли анодом була рідина. Фланець на який подавався „+”, мав заземлення. Баластний опір не використовувався. Умови пробою

регулювалися за допомогою трьох параметрів: рівень рідини, величина потоку газу, величина поданої напруги між електродами. Для реєстрації емісійних спектрів використовувалася система, яка складалася зі світловода, спектрального приладу S-150-2-3648 USB, та комп’ютера [1]. Спектрометр працював в діапазоні довжин хвиль від 200 до 1100 нм. За допомогою комп’ютера відбувалося керування процесом вимірювання та оброблялися дані, що надходили зі спектрометра.

За емісійними спектрами було визначено компонентний склад плазми. Для визначення коливних  $T_v$  та обертових  $T_r$  рівнів використовувалось порівняння експериментально виміряних емісійних спектрів із модельованими за допомогою програми SPECAR [1]. Для моделювання використовувались коливні  $T_v$  та обертові  $T_r$  температури, які задавалися безпосередньо в програмі SPECAR [1], та електронної температури  $T_e^*(H)$ . Електронна температура  $T_e^*(H)$  була визначена методом відносних інтенсивностей за двома спектральними лініями атому водню  $H_\alpha$  (656,3 нм) та  $H_\beta$  (486,1 нм).

За допомогою відеокамери Nikon L100 досліджено процес горіння розряду за різних режимів роботи. Під час досліджень робочим газом було повітря, яке подавалося за допомогою компресора і регулювалося за допомогою ротаметра, а робочою рідиною була дистильована вода, але вона не була деіонізована. Відстань між поверхнею рідини та верхнім фланцем – 15 мм. Товщина шару рідини – 15 мм.

### Результати та їх обговорення

Горіння розряду в плазмово-рідинній системі зі зворотно-вихровим потоком повітря типу „торнадо”, коли „рідким” електродом є вода, супроводжується електролізом води з виділенням бульбашок біля нижнього фланцю. Утворившись, бульбашки піднімаються вгору (рис. 2) до межі контакту „плазма-рідина”. Канал по якому піднімаються бульбашки має форму

схожу до „вулкану”. Така форма каналу пов’язана швидше за все із конвективними потоками нагрітої води. Біля поверхні нижнього фланцю за режиму роботи РК утворювалось вдвічі більше бульбашок ніж, за режиму роботи – РА за однакової величини струму розряду. Така відмінність пов’язана з тим, що за режиму РК в рідині утворюються бульбашки молекулярного водню  $H_2$ , а за режиму РА – кисень  $O_2$ . Перенесення зарядів за одиницю часу однакове (струм в обох випадках однаковий) для обох полярностей. У випадку РК до нижнього фланцю потрапляє  $H^+$ . Два  $H^+$  нейтралізуючись утворюють одну молекулу  $H_2$ . У випадку ТК до нижнього фланцю потрапляє  $OH^-$ . Нейтралізуючись чотири  $OH^-$  утворюють  $O_2$  і  $H_2O$ . Тому кисню під час електролізу води утворюється вдвічі менше ніж водню.

Бульбашки, які потрапляли на межу контакту „плазма-рідина” зникали, а бульбашки, які не потрапляли на цю межу залишалися в об’ємі рідини. Це може бути пов’язано із впливом плазми на поверхневий натяг рідини. На рис. 3 зображено світлину плазмово-рідинної системи під час горіння розряду після виходу на стаціонар. На рис. 4 зображено світлину тієї ж плазмово-рідинної системи після виходу на стаціонар електролізу води. На поверхню води поклали металеву сітку виготовлену з нержавіючої сталі з кроком 4 мм, площа та форма якої відповідали візуальній площі контакту плазма-рідина під час горіння розряду. Струм, потік повітря, режим роботи та часові проміжки після початку протікання струму на рис. 3-4 ідентичні. Падіння напруги на шарі води товщиною 15 мм під час електролізу було 600 В. Усереднене значення падіння напруги на рідині рівне 40 В/мм. Слід зазначити, що у випадку електролізу бульбашки накопичувались у воді і не відразу покидали її об’єм. На бульбашку діє сила Архімеда, яка виштовхує її з рідини та поверхневий натяг, який не дає бульбашці покинути об’єм рідини (силою тяжіння нехтуємо, бо густина рідини на 3 порядки більша ніж густина газу). Вихід газу з рідини,

утвореного при електролізі, значно полегшується на контакті рідина – плазма, що свідчить про суттєвий вплив плазми на поверхневий натяг рідини.



Рис. 2. Плазмово-рідинна система через 1 секунду після того, як запалили розряд: режим роботи – РА; струм – 280 мА; потік повітря – 5 л/хв.

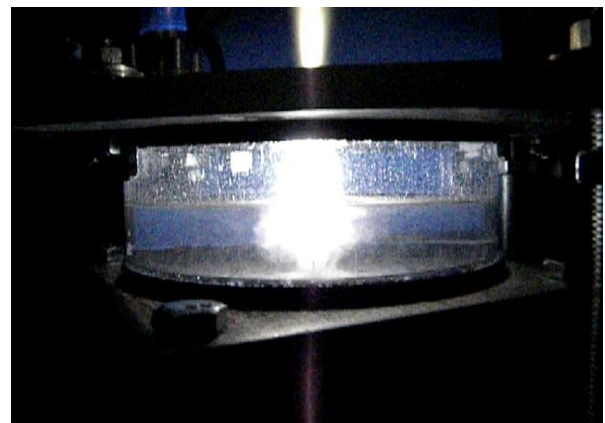


Рис. 3. Плазмово-рідинна система після виходу на стаціонар: режим роботи – РА; напруга – 2,4 кВ; струм – 280 мА; потік повітря – 5 л/хв.

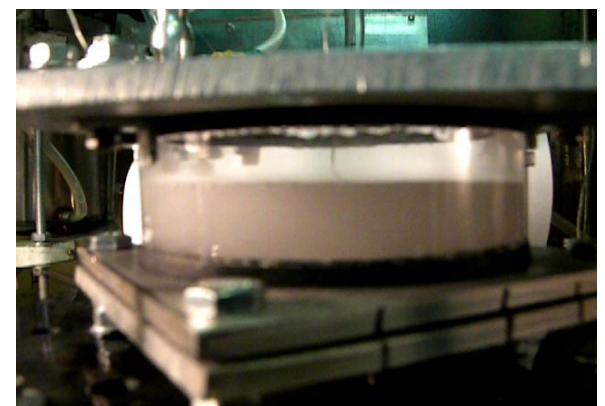


Рис. 4. Електроліз води в плазмово-рідинній системі після виходу на стаціонар: режим роботи – РА; напруга – 0,6 кВ; струм – 280 мА; потік повітря – 5 л/хв, на поверхні сітка, з кроком 4мм.

На рис. 5 зображено вольт-амперні характеристики плазово-рідинної системи під час горіння розряду. Вони виміряні після виходу системи на стаціонар за сталої товщини шару рідини 15 мм, потоку повітря та різних режимів роботи – РК та РА. Вольт-амперні характеристики вимірювалися змінюючи струм розряду і фіксуючи при цьому напругу. Вольт-амперні характеристики за режимів РК та РА мають однаковий характер поведінки зі зміною струму. Однак, падіння напруги за режиму РК на 400 В більше ніж за режиму ТК, що може бути пов'язано із тим, що для виникнення вторинної емісії з поверхні рідини потрібні більші поля ніж для виникнення вторинної емісії з металевої поверхні. Як відомо [2], коефіцієнт вторинної електрон-іонної емісії для води менший ніж для металів.

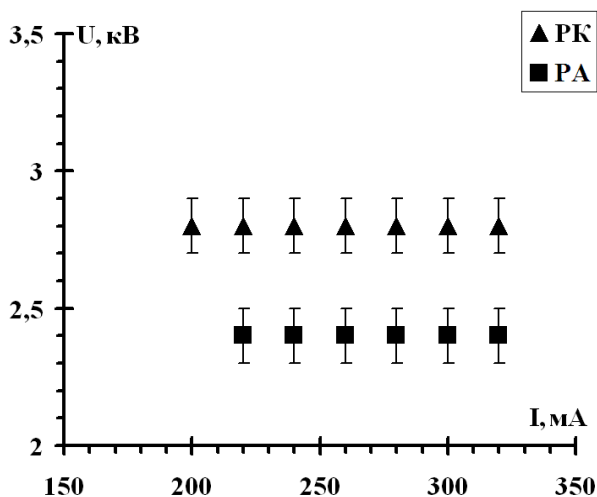


Рис. 5. Вольт-амперні характеристики плазово-рідинної системи зі зворотно-вихровим потоком повітря типу „торнадо” з „рідким” електродом під час горіння розряду: потік повітря - 5 л/хв відстань між поверхнею рідини та верхнім фланцем – 15 мм.

На рис. 6 зображені світлини плазового факелу в плазово-рідинній системі зі зворотно-вихровим потоком повітря типу „торнадо” з „рідким” електродом (вода) за режимів роботи РК та РА. За режиму роботи РК плазовий факел має меншу довжину та діаметр ніж за режиму РА. Оскільки, для того, щоб підвищити енергоефективність плазових систем, необхідно вбудовувати їх в

традиційні хімічні технології, а плазму при цьому потрібно ефективно інжектувати в реакційну камеру, то режим роботи РА є більш цікавим, оскільки на більшу глибину в реакційну камеру можна інжектувати активовані плазмою частинки.

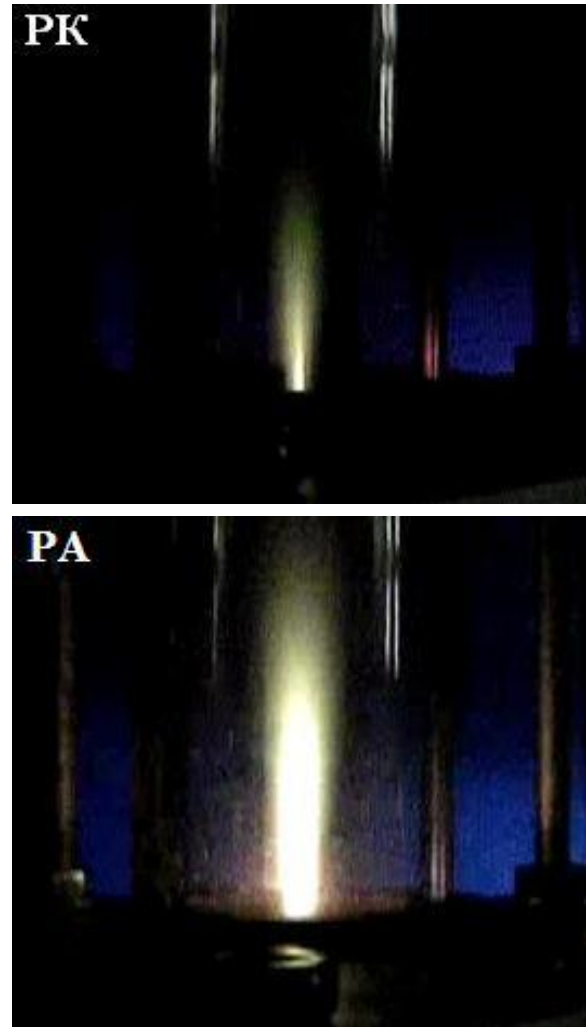


Рис. 6. Світлини плазового факелу в плазово-рідинній системі зі зворотно-вихровим потоком повітря типу „торнадо” з „рідким” електродом (вода), який інжектується в реакційну камеру за режимів роботи РК та РА: потік повітря – 5 л/хв відстань між поверхнею рідини та верхнім фланцем – 15 мм, товщина шару рідини – 15 мм.

На емісійних спектрах в проміжку між електродами (посередині відстані між поверхнею рідини та верхнім фланцем) та у плазовому факелі основними компонентами є ОН, Н та О. Одразу при виході із верхнього металевого фланця на емісійних спектрах спостерігається  $N_2$ [3]. Компонентів металевих електродів (мідь та нержавіюча сталь) не виявлено на

емісійних спектрах. Це свідчить про те, що матеріал металевого електроду не вноситься в розрядний проміжок. Оскільки основним механізмом руйнування металевих електродів в рідинах є анодне розчинення, то в нашому випадку електрод, який контактує з рідиною є пасивований.

На рис. 7 зображено залежності електронних температур  $T_e^*(H)$  визначених за відносними інтенсивностями двох спектральних ліній атому водню від величини потоку повітря.

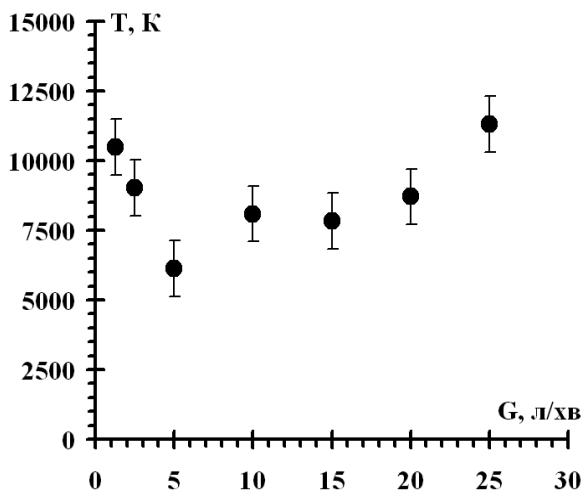


Рис. 7. Залежність електронної температури  $T_e^*(H)$  від величини потоку повітря: режим роботи – РА; струм – 280 мА; світловод орієнтувався на середину проміжку між „рідким” електродом та верхнім фланцем (7,5 мм над поверхнею рідини).

Дана залежність (рис. 7) має не монотонний характер. Це може бути пов’язано зі зміною плазмотвірного газу та значення абсолютного тиску всередині розрядної камери. Зі збільшенням потоку повітря (1,25-5 л/хв) електронна температура  $T_e^*(H)$  зменшується внаслідок зміни складу плазмотвірного газу – зростає співвідношення повітря/вода, а основним механізмом виносу води є її випаровування. В діапазоні потоків 5-10 л/хв. з’являється ще один механізм внесення води в область розряду – зривання краплинок з кінчика конусоподібного стовпа рідини, який утворюється внаслідок зменшення абсолютного тиску всередині камери завдяки зростанню його динамічної складової. В діапазоні потоків повітря 15-

25 л/хв відбувається зростання  $T_e^*(H)$  внаслідок збільшення випаровування води (зростає напруга живлення розряду при сталому струмі) та зменшення абсолютного тиску всередині камери внаслідок зростання його динамічної складової, що веде до збільшення приведенного поля  $E/p$ .

На рис. 8 зображено розподіл електронної температури  $T_e^*(H)$  вздовж плазмового факелу. Світловод орієнтувався на середину проміжку між рідким електродом та верхнім фланцем (7,5 мм над поверхнею рідини). Зі збільшенням відстані від верхнього фланця  $h$ ,  $T_e^*(H)$  спочатку падає, а потім знаходиться на певному рівні  $T_e^*(H) = 3500 \pm 750$  К. Схожа поведінка  $T_e^*(H)$  (рис. 8) спостерігається і при інших значеннях потоку повітря (1,25-25 л/хв).

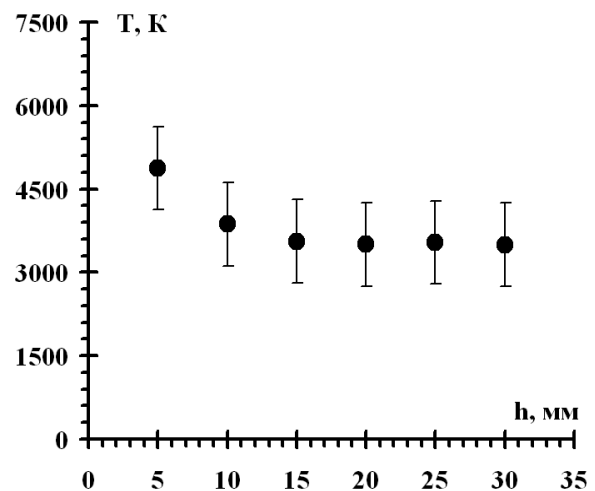


Рис. 8. Розподіл електронної температури  $T_e^*(H)$  вздовж плазмового факелу: режим роботи – РА; напруга – 2,4 кВ; струм – 280 мА; потік повітря – 5 л/хв.

В проміжку між електродами за потоку повітря 5 л/хв коливна та обертова температури є однаковими  $T_v = T_r = 4000 \pm 200$  К, а електронна температура  $T_e^*(H) = 6000 \pm 750$  К. У плазмовому факелі за потоку повітря 5 л/хв ( $h = 5$  мм)  $T_v = 4000 \pm 200$  К більша за  $T_r = 3000 \pm 200$  К, а електронна температура  $T_e^*(H) = 4900 \pm 750$  К. Отже плазма в плазмовому факелі відноситься до нерівноважної “теплої” [4].

Знаючи тиск всередині камери, температуру та величину електричного

поля можемо оцінити вплив складу газу на температуру електронів за допомогою програми BOLSIG+[5]. Вважатимемо, що тиск всередині камери 1 атмосфера. Зазвичай обертова температура  $T_r$  близька до температури газу, тому будемо вважати, що температура газу в області розряду між поверхнею рідини та верхнім фланцем  $T_{\text{gas}} = 4000$  К. Вважатимемо, що поле між поверхнею рідини та верхнім металевим фланцем за режиму роботи РА є однорідним по всій довжині, тоді врахувавши падіння напруги на рідині під час електролізу та знаючи відстань між електродами знайдемо, що  $E = 1200$  В/см. Тоді приведене поле буде рівне близько 60 Тд. Будемо вважати, що вся вода, яка випаровується, і повітря, яке подається в систему, потрапляють в область розряду, а склад робочого газу є однорідним і постійно оновлюється. На рис. 9 зображено залежність температури електронів  $T_e$  від величини потоку повітря.

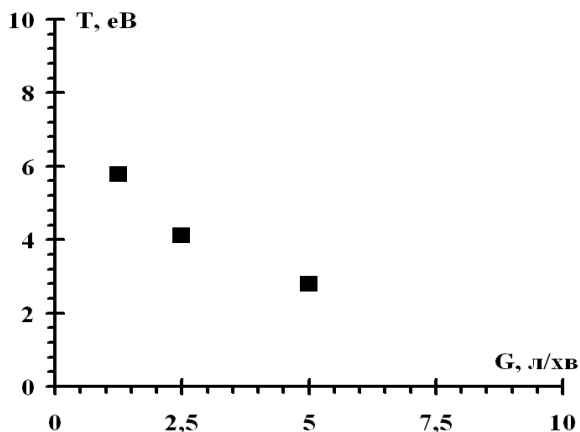


Рис. 9. Залежність температури електронів  $T_e$  від величини потоку повітря: режим роботи – РА, витрати води – 3 мл/хв, розрахунки проводились за допомогою програми BOLSIG+[5].

Витрати води в діапазоні потоків повітря 1,25-5 л/хв становили 3 мл/хв.

З рис. 9 видно, що зі збільшенням потоку повітря (1,25-5 л/хв) температура електронів зменшується. Така ж тенденція спостерігалась і на рис. 7 для  $T_e^*(H)$ , що може слугувати частковим підтвердженням припущення сформульованого вище. Однак поведінка електронної температури  $T_e^*(H)$  (рис. 7) потребує подальшого більш детального дослідження. Для цього необхідно виміряти електричне поле експериментальним шляхом та дослідити витрати рідини в діапазоні потоків повітря 10-25 л/хв.

### Висновки

В плазмово-рідинній системі зі зворотно-вихровим потоком повітря типу „торнадо” з „рідким” електродом матеріал металевого електроду (нержавіюча сталь) не вноситься в розрядний проміжок. Показано, що плазма розряду в зворотно-вихровому потоці типу „торнадо” з „рідким” електродом відноситься до нерівноважної „теплої” плазми. Виявлено, що вихід газу з рідини, утвореного при електролізі, значно полегшується на контакті „плазма-рідина”, що свідчить про суттєвий вплив плазми на поверхневий натяг рідини.

*Дана робота виконана за часткової підтримки Міністерства освіти і науки України, Національної академії наук України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка.*

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. C.O.Laux, T.G.Spence, C.H.Kruger, R.N.Zare. Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasma SPECAIR // Plasma Source Sci. Technol. – 2003. – V. 12. – P. 125-138.
2. А.И.Максимов, А.В.Хлюстова. Физическая химия плазменно-растворных систем // V Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, 3–8 сентября, 2008, Иваново, Россия, сборник трудов. – Иваново. – 2008. – С. 67-70.
3. O.A.Nedybaliuk, V.Ya.Chernyak, S.V.Olszewski, E.V.Martysch. Dynamic Plasma-Liquid System with Discharge in Reverse Vortex Flow of “Tornado” Type // International Journal of Plasma

- Environmental Science & Technology. – 2011. –V. 5. – P. 20-24.
4. A.A.Fridman. Plasma Chemistry.– Cambridge University Press, Cambridge. –2008.
5. G.J.M.Hagelaar, L.C.Pitchford. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // Plasma Sources Sci. Techn. – 2005. – V. 14.– P. 722-733.

Стаття надійшла до редакції 29.06.2015.

O.A.Nedybaliuk

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Volodymyrska Street, 60, Kyiv, 01033

## PLASMA-LIQUID SYSTEM WITH REVERSE VORTEX AIRFLOW OF „TORNA DO” TYPE WITH LIQUID ELECTRODE

Plasma-liquid system with «tornado»-type reverse vortex airflow and liquid water electrode was investigated. Discharge behavior and water electrolysis were studied using Nikon L100 video camera. The current-voltage characteristics of discharge in different operating modes were obtained. Plasma was analyzed by emission spectroscopy. The electron temperature and its distribution along the plasma torch were determined based on the relative intensities of two hydrogen atomic lines ( $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ). Vibrational and rotational temperatures were calculated.

**Keywords:** plasma-liquid system, discharge, liquid electrode, reverse vortex flow, plasma torch.

О.А.Недыбалюк

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 60, Киев, 01033

## ПЛАЗМЕННО-ЖИДКОСТНАЯ СИСТЕМА С ОБРАТНО-ВИХРЕВЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА ТИПА „ТОРНАДО” С „ЖИДКИМ” ЭЛЕКТРОДОМ

Исследована плазменно-жидкостная система с обратнo-вихревым потоком воздуха типа „торнадо” с „жидким” электродом (вода). С помощью видеокамеры Nikon L100 исследовано процесс горения разряда и электролиза воды. Измерены вольтамперные характеристики данного разряда при разных режимах работы. Для исследования плазмы использовалась эмиссионная спектроскопия. По относительным интенсивностям двух линий атома водорода ( $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ) определена электронная температура и ее распределение вдоль плазменного факела. Определена колебательная и вращательная температуры.

**Ключевые слова:** плазменно-жидкостная система, разряд, „жидкий” электрод, обратнo-вихревой поток, плазменный факел.