

## Построение и применение систем генерации плазмы диэлектрического барьерного разряда с жидкостным электродом

*Е. К. Железнова, О. М. Чернаусик, Д. А. Котов*

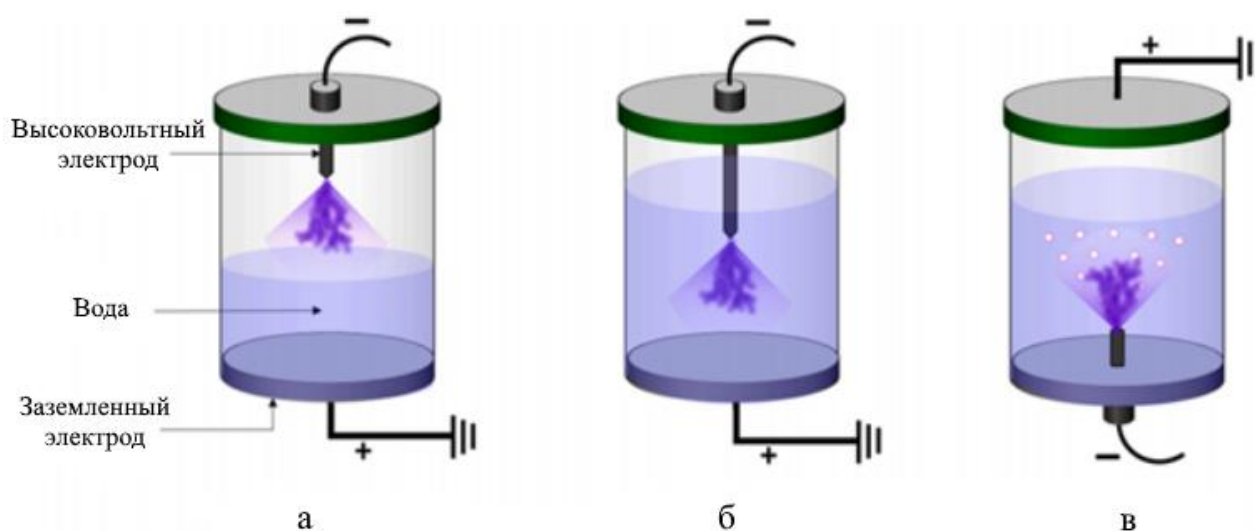
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

В работе представлены результаты аналитических исследований трёх форм плазменно-жидкостных разрядов. Описаны их особенности и области их потенциальных применений. Большой интерес представляет собой газовый и гибридный разряды в связи с их возможностью для обработки биологических объектов.

**Ключевые слова:** диэлектрический барьерный разряд, жидкостный электрод, плазма при атмосферном давлении.

В последние годы плазменно-жидкостные системы привлекли значительное внимание исследователей в различных областях применения, включая очистка окружающей среды и сточных вод [1,2], процессы создания наноразмерных структур [3,4], лечение раковых клеток [5], стерилизация и дезинфекция [6], предотвращение и уничтожение бактериальной биопленки [7] и аналитическая химия [8] и т. д. В частности, были опробованы методы обработки плазмой: 1) для разложения многих вредных соединений из воды, в том числе: гербициды [9], пестициды [10], фенолы [1, 11], органические красители [12],  $As^{3+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$  и  $Zn^{2+}$  [13,14], биомолекулы, инактивация вирусов и бактерий [15–17], фармацевтические препараты [18] и ветеринарные антибиотики [19]; 2) для возможного удаления химических и биологических отходов во всех трех состояниях: газ, жидкость и твердое тело [20].

На данный момент существует 3 основных конфигурации плазменно-жидкостных систем: газовый, жидкостный и гибридный разряды. На рис. 1 показаны схемы данных разрядов.



а) газовая разрядная система; б) жидкостная разрядная система; в) гибридная (газ-жидкость) разрядная система

Рис.1. Схема различных разрядно-плазменных систем, используемых для очистки воды

Газовый разряд создает большое количество активных форм кислорода, а также радикалов нитратов, нитритов и NO. Такой разряд имеет сходство с контактным электролизом тлеющего разряда, когда металлический анод залит жидкостью, а плазма создается в слое пара. Здесь значительная часть мощности разряда теряется в жидкости, вызывая в ней высокие

скорости испарения. В такой разрядной системе для генерации активных частиц используется меньше энергии.

Жидкостный разряд генерируется под действием импульсов длительностью в несколько наносекунд, напряжением постоянного тока и/или возбуждением переменным током с частотами от 50–60 Гц до ГГц. Также здесь требуется больше энергии, чем в газовом разряде. Кроме того, время существования плазмы в воде очень мало из-за активного обмена высокоэнергетическими электронами с окружающей водной средой. Прямой электрический разряд, применяемый в воде, генерирует плазменные каналы с повышенной температурой (стримеры), создавая электрогидравлическую кавитацию, сверхкритическое окисление воды, а также образование короткоживущих радикалов путем ультрафиолетового фотолиза. Тем не менее жидкостный разряд представляет собой достаточно простую систему и позволяет формировать химически активные частицы непосредственно в воде, которые способны эффективно воздействовать на растворенные загрязнения.

Гибридный разряд характеризуется большой площадью контактной поверхности, что приводит к высокой эффективности диффузии газообразных частиц внутри жидкости и меньшим затратам энергии на создание плазмы, чем прямой разряд в жидкости. Кроме того, на границе раздела газ-жидкость могут образовываться чрезвычайно реактивные частицы, такие как  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{OH}$  или  $\text{HO}^{\bullet}_2$ , и эти частицы будут поддерживать разрушение целевых загрязняющих веществ. А также, в плазме атмосферного разряда массивный поток электронов сталкивается с границей раздела фаз вода-воздух, индуцируя высокоактивные электроны, растворенные в жидкости, с высокой концентрацией. В том числе значительное количество активных форм кислорода и радикалов  $\text{OH}^{\bullet}$  также образуются вблизи границы раздела фаз.

Исходя из вышепредставленных описаний разрядных систем можно сделать выводы о том, что газовая и гибридная разрядные системы представляют наибольший интерес для реализации процессов обработки поверхностей объектов, в том числе биологической природы.

#### Список источников

- [1] **Jiang, B.** Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation / B. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Q. Zhang // *Chemical Engineering Journal*. — 2014. Vol. 236. — P. 348–368.
- [2] **Jufang, Z.** Remove of Phenolic Compounds in Water by Low-Temperature Plasma: A Review of Current Research / Z. Jufang, C. Jierong, L. Xiaoyong // *Journal of Water Resource and Protection*. — 2009. — Vol. 1. — P. 99–109.
- [3] **Sato, S.** Synthesis of nanoparticles of silver and platinum by microwave-induced plasma in liquid / S. Sato, K. Mori, O. Ariyada, H. Atsushi, T. Yonezawa // *Surface Coatings Technology*. — 2011. — Vol. 206. — P. 955–958.
- [4] **Chen, L.** Synthesis of zirconium carbide (ZrC) nanoparticles covered with graphitic “windows” by pulsed plasma in liquid / L. Chen, C. Iwamoto, E. Omurzak // *RSC Advances*. — 2011. — Vol. 1. — P. 1083–1088.
- [5] **Fridman, G.** Applied plasma medicine / G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, A. Shekhter, V. Vasilets, A. Fridman // *Plasma Processes and Polymers*. — 2008. — Vol. 5. — P. 503–533.
- [6] **Ziuzina, D.** Atmospheric Cold Plasma Inactivation of Escherichia Coli in Liquid Media Inside a Sealed Package / D. Ziuzina, S. Patil, P. Bourke, K. Keener, P. Cullen // *Journal of Applied Microbiology*. — 2013. — Vol. 114. — P. 778–787.
- [7] **Ermolaeva, S.A.** Atmospheric pressure nonthermal plasmas for bacterial biofilm prevention and eradication / S.A. Ermolaeva, E.V. Sysolyatina, A.L. Gintsburg // *Biointerphases*. — 2015. — Vol. 10. — № 029404. — P. 1–11.

- [8] **Profrock, D.** Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) "for quantitative analysis in environmental and life sciences: A review of challenges, solutions, and trends / D. Profrock, A. Prange // *Applied Spectroscopy*. — 2012. — Vol. 66. — P. 843–868.
- [9] **Nani, L.** ROS production and removal of the herbicide metolachlor by air non-thermal plasma produced by DBD, DC- and DC+ discharges implemented within the same reactor / L. Nani, F. Tampieri, E. Ceriani, E. Marotta, C. Paradisi // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2018. — Vol. 51. — № 274002.
- [10] **Misra, N.N.** The contribution of non-thermal and advanced oxidation technologies towards dissipation of pesticide residues / N.N. Misra // *Trends in Food Science and Technology*. — 2015. — Vol. 45. — P. 229–244.
- [11] **Lukes, P.** Degradation of substituted phenols in a hybrid gas–liquid electrical discharge reactor / P. Lukes, B.R. Locke // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. — 2005. — Vol. 44. — P. 2921–2930.
- [12] **Tao, X.** A novel two-level dielectric barrier discharge reactor for methyl orange degradation / X. Tao, G. Wang, L. Huang, Q. Ye, D. Xu // *Journal of Environmental Management*. — 2016. — Vol. 184. — P. 480–486.
- [13] **Jiang, B.** A green approach towards simultaneous remediations of chromium (VI) and arsenic (III) in aqueous solution / B. Jiang, J.B. Guo, Z.H. Wang, X. Zheng, J.T. Zheng, W.T. Wu, M.B. Wu, Q.Z. Xue, // *Chemical Engineering Journal*. — 2015. — Vol. 262. — P. 1144–1151.
- [14] **Khlyustova, A.** Plasma-induced precipitation of metal ions in aqueous solutions / A. Khlyustova, N. Sirotkin, V. Titov // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. — 2019. — Vol. 94. — P. 3987–3992.
- [15] **Rossi, F.** Decontamination of surfaces by low pressure plasma discharges / F. Rossi, O. Kyli'an, M. Hasiwa // *Plasma Processes and Polymers*. — 2006. — Vol. 3. — P. 431–442.
- [16] **Scholtz, V.** The influence of parameters of stabilized corona discharge on its microbicidal effect / V. Scholtz, L. Kommova, J. Julak // *Acta Physica Polonica A*. — 2011. — Vol. 119. — P. 803–806.
- [17] **Alshraiedeh, N.** Atmospheric pressure, nonthermal plasma inactivation of MS2 bacteriophage: effect of oxygen concentration on virucidal activity / N. Alshraiedeh, M. Alkawareek, S. Gorman, W. Graham, B. Gilmore // *Journal of Applied Microbiology*. — 2013. — Vol. 115. — P. 1420–1426.
- [18] **Magureanua, M.** Degradation of antibiotics in water by non-thermal plasma treatment / M. Magureanua, D. Piroia, N.B. Mandachea, V. Davidb, A. Medvedovicb, C. Braduc, V.I. Parvulescu // *Water Research*. — 2011. — Vol. 45. — P. 3407–3416.
- [19] **Kim, K.-S.** Degradation of veterinary antibiotics by dielectric barrier discharge plasma / K.-S. Kim, C.-S. Yang, Y.S. Mokb // *Chemical Engineering Journal*. — 2013. — Vol. 219. — P. 19–27.
- [20] **Cheng, H.-H.** Non-thermal plasma technology for degradation of organic compounds in wastewater control: a critical review / H.-H. Cheng, S.-S. Chen, Y.-C. Wu, D.-L. Ho // *Environmental Engineering and Management Journal*. — 2007. — Vol. 17 (6). — P. 427–433.

## **Construction and application of systems for generating plasma of a dielectric barrier discharge with a liquid electrode**

*E. K. Zheleznova, V. M. Charnavusik, D. A. Kotov*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

### **Annotation**

This work presents the results of analytical studies of three forms of plasma-liquid discharges. Their characteristics and potential application areas are described. The particular interest are the gas and hybrid discharges due to their ability to process biological objects.

**Keywords:** Dielectric barrier discharge, Liquid electrode, Atmospheric pressure plasma