

## ПЛОТНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ОДНОКАНАЛЬНОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ

А.К.Шуаибов, докт. физ.-мат. наук, Л.В.Месарош, канд. физ.-мат. наук, М.П.Чучман, канд. физ.-мат. наук  
Ужгородский национальный университет,  
ул. Подгорная, 46, Ужгород, 88000, Украина,  
e-mail: [shuaibov@i.ua](mailto:shuaibov@i.ua)

*Приведены зависимости удельной электрической мощности тлеющего разряда над поверхностью дистиллированной воды, площади катодного пятна и поперечного сечения положительного столба от величины тока разряда. Выполнены оценки максимальной плотности электронов в катодной части разряда и его положительном столбе при токах 10-32 мА. Максимальная плотность электронов может достигать  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  в катодной части тлеющего разряда, а в положительном столбе она не будет превышать  $2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .*

Библ. 11, рис. 3.

**Ключевые слова:** плотность электронов, тлеющий разряд, дистиллированная вода, удельная электрическая мощность тлеющего разряда, площадь катодного пятна, площадь поперечного сечения положительного столба.

**Введение.** Плазма тлеющего разряда с водяным катодом в воздухе атмосферного давления является сильнонеравновесной, служит источником радикалов, атомов водорода и кислорода. Она находит все более широкое применение в системах очистки воды, воздуха, медицине, в сельском хозяйстве и других технологических процессах [1, 2]. Значительно меньше исследован такой разряд с точки зрения физики процессов и параметров плазмы. Хотя устойчивый тлеющий разряд атмосферного давления в воздухе существует в широком диапазоне токов (0,001–5) А [3, 5], изучать параметры плазмы более удобно в околопороговой области токов (1–50) мА, когда он является одноканальным с довольно простыми пространственными характеристиками. При этом нагревание воды минимально, и нет необходимости в ее добавке и прокачке с целью поддержания постоянного расстояния между металлическим анодом и поверхностью воды.

Плотность электронов – это базовый параметр разряда, определяющий его использование в различных технологиях. В подобном разряде она оценивалась в работе [10] по зондовым измерениям и поглощению СВЧ излучения в центре разрядного промежутка тлеющего разряда, сформированного между анодом и катодом в виде струй технической воды в воздухе атмосферного давления ( $n_e \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ). Некоторые электрические и оптические характеристики тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления с катодом на основе дистиллированной воды и растворов медного купороса приведены в [8, 9]. Для оценки плотности электронов в этих разрядах требуется более детальное исследование его пространственных характеристик, что позволяет оценить величину  $n_e$  по плотности тока.

Основной целью статьи было определение плотности электронов в разных пространственных областях одноканального тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления с катодом на основе дистиллированной воды.

**Условия эксперимента.** Тлеющий разряд зажигался на поверхности дистиллированной воды в кювете из оргстекла объемом один литр. Металлический анод (иголка из меди диаметром 2 мм) устанавливался над поверхностью дистиллированной воды в воздухе атмосферного давления. Оптимизация по объему разряда и интенсивности его излучения для межэлектродного расстояния «кончик анода – поверхность воды» показала, что оно составляет  $d=7$  мм [8], поэтому все исследования проведены при этом расстоянии. Толщина воды над поверхностью металлического катода, погруженного в воду, составляла 3–4 мм. Разряд зажигался при помощи высоковольтного источника постоянного тока (напряжение  $U=1-25$  кВ; ток  $I=1-100$  мА), а для стабилизации горения тлеющего разряда применялось балластное сопротивление  $R=434$  кОм. Геометрические размеры тлеющего разряда определялись фотографированием соответствующего плазмообразования при разных токах. Электрическая мощность разряда определялась на основании вольт-амперных характеристик, измеренных с использованием киловольтметра С-196 и миллиамперметра М 906.

**Характеристики и параметры тлеющего разряда.** Фотографии тлеющего разряда над поверхностью дистиллированной воды при разных условиях зажигания представлены в [8], а некоторые результаты их цифровой обработки показаны на рис. 1, где представлена зависимость площади ка-

тодного пятна (1) и поперечного сечения положительного столба (2) от тока тлеющего разряда. Как видно из рис. 1, при небольших токах ( $I=10$  мА) площадь катодного пятна  $S=14$  мм<sup>2</sup> значительно больше поперечного сечения положительного столба. С увеличением тока до 32 мА наблюдался непрерывный рост поперечного сечения положительного столба примерно до 22 мм<sup>2</sup>, а площадь катодного пятна уменьшалась до 8,5–9,5 мм<sup>2</sup> при токах 17–32 мА и там стабилизировалась, что может быть связано с доминированием в плазме тех или иных газофазных реакций.

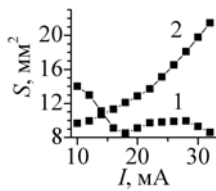


Рис. 1.

При увеличении тока происходит сильное насыщение воздуха парами воды с образованием гидроксила и пероксида водорода, оксида азота, а также других продуктов химических реакций в газовой фазе [7]. Поэтому для избежания насыщения воды азотсодержащими соединениями [11], а также наиболее оптимальным по площади (рис. 1) для обработки загрязненной поверхности воды является режим горения разряда при малых токах ( $I=5-10$  мА). Для синтеза химических соединений в газовой фазе подходящими будут токи  $I \geq 25$  мА, когда объем разряда увеличивался (рис. 2).

Вместе с тем при увеличении тока усиливается электролитическая диссоциация, что способствует очистке объема воды и увеличению эффективности ионных реакций в нем, что, в свою очередь, приводит к агломерации продуктов электролитической диссоциации и электрохимических процессов для растворенных в воде неорганических соединений [9]. В целом, для оптимального подбора режима очистки воды необходимо учитывать степень и вид загрязнения.

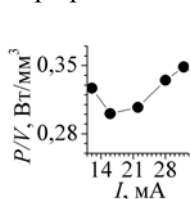


Рис. 2.

Вольтамперные характеристики исследуемого тлеющего разряда при разных  $d=(1-7)$  мм приведены в [8]. Их обработка показала, что максимальная величина катодного падения потенциала  $U_k = 495$  В достигалась при токе 12 мА, а при увеличении тока она уменьшалась до 440 В. На рис. 2 показана зависимость усредненной по объему плазмы электрической мощности тлеющего разряда с водяным катодом от величины тока. Электрическая мощность тлеющего разряда при увеличении тока от 12 до 32 мА увеличивалась практически по линейному закону в диапазоне 15–32 Вт.

При увеличении тока от 12 до 16 мА удельная электрическая мощность разряда уменьшалась от 0,33 до 0,3 Вт/мм<sup>3</sup>, а после этого плавно увеличивалась до 0,35 Вт/мм<sup>3</sup> с ростом тока до 32 мА (рис. 2). При увеличении тока в диапазоне 22–32 мА, объем разряда линейно увеличивался от 65 до 80 мм<sup>3</sup>, а при увеличении тока от 12 до 16 мА объем плазмообразования уменьшался с 73 до 65 мм<sup>3</sup>. Такой вид зависимости объема разряда от тока связан с постепенным увеличением плотности паров воды в разрядном промежутке (и радикалов OH), а при  $I \geq 25$  мА – резким увеличением плотности NO [8].

Оценки величины концентрации электронов в разных частях тлеющего разряда проведены по величине измеряемого тока ( $I$ ) и геометрическим размерам плазмы по формуле  $n_e=(I/S)(1/ev_{dr})$ , где  $e$  – заряд электрона,  $n_e$  – плотность электронов,  $v_{dr}$  – скорость дрейфа электронов,  $S$  – площадь поперечного сечения плазмы. Более полно методика оценки плотности электронов в тлеющем разряде над поверхностью жидкости описана в [4].

Скорость дрейфа электронов в разряде может быть представлена в виде произведения напряженности электрического поля ( $E$ ) и подвижности электронов ( $\mu$ )  $v_{dr}=\mu E$ , где  $\mu=(2el/mE)^{0,5}$  (здесь  $l$  – длина сводного пробега электрона,  $m$  – масса электрона). Образование заряженных частиц происходит преимущественно в катодном слое тлеющего разряда, где плотность заряженных частиц максимальна. Оценку максимального значения напряженности электрического поля в катодной области можно получить по формуле  $E=E_i/el$ , где  $E_i$  – энергия ионизации молекулы азота.

Зная, что (согласно теории столкновений) размер катодного и анодного слоя составляет примерно  $10^{-6}$  м, а катодное падение потенциала ( $U_k$ ) намного больше чем анодное ( $U_a$ ), напряженность электрического поля в положительном столбе возможно оценить из отношения  $(U-U_k)/d$ , (где  $d$  – расстояние между электродами) [6]. Определив из вольт-амперных характеристик разряда при разных межэлектродных расстояниях [6] величину катодного падения потенциала, можно установить размер катодной области тлеющего разряда  $h_k = U_k/E$ .

Для расчетов плотности электронов в разных областях тлеющего разряда с катодом из дистиллированной воды использовались нормальные условия. Длина сводного пробега электронов (расстояние, которое в среднем проходит электрон до его столкновения с атомами газа) оценивалась через диаметр  $D$  и плотность молекул азота  $n_{N_2}$  ( $n_{N_2}=p/kT$ ):  $l=1/(2^{0,5} \pi D^2 n_{N_2})$ . Приближения, что газом является азот и  $U_a \ll U_k$ , могут внести погрешность в вычисления до 30 %. Ввиду сильной зависимости длины свободного пробега от параметров плазмы, принятые допущения позволили сделать оценки

максимальной величины  $n_e$  из-за того, что реальная длина свободного пробега может быть в несколько раз больше оценочной. Из-за упрощений получаем средний множитель от 0,2 до 1,3, что и будет отображать погрешность расчетов как нижней, так и верхней границ концентрации электронов.

Таким образом, для катодной части разряда получено, что максимальная величина напряженности электрического поля составляет  $E=1,7 \times 10^8$  В/м, высота катодного слоя –  $2,6 \times 10^{-6}$  м, подвижность электронов –  $0,0134$  м<sup>2</sup>/В·с, скорость дрейфа электронов –  $2,36 \times 10^6$  м/с и величина параметра –  $E/N=7185$  Тд. Для положительного столба разряда –  $E=77250$  В/м, подвижность электронов –  $0,6398$  м<sup>2</sup>/В·с, скорость дрейфа электронов –  $49427$  м/с и величина параметра –  $E/N=3,2$  Тд.

Результаты оценок максимальной плотности электронов в разных частях тлеющего разряда с водяным катодом для токов в диапазоне 10–32 мА показаны на рис. 3: ● – в положительном столбе; ■ – в катодной части. Величина  $n_e$  в катодной части разряда с ростом тока увеличивалась от  $2$  до  $10 \times 10^{12}$  см<sup>-3</sup> в диапазоне токов 10–30 мА, плотность электронов в положительном столбе при этом увеличивалась от  $1$  до  $2 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. При больших токах величина  $n_e$  в положительном столбе разряда стабилизировалась на уровне  $2 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Увеличение плотности электронов в катодной части тлеющего разряда на фоне незначительного изменения диаметра катодного пятна указывает на образование в катодном слое молекул с малыми потенциалами ионизации. В нашем случае такими могут быть радикалы ОН и NO [6].

Таким образом, исследования тлеющего разряда с катодом из дистиллированной воды показали, что в воздухе атмосферного давления при токах до 32 мА разряд существует в форме одного канала с диффузным положительным столбом и катодной частью; максимальная плотность электронов при токах 30–32 мА в катодном слое разряда может достигать  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, а в положительном столбе она не превышает  $2 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

Исследования проведены при частичном финансировании за счет программы «Украина – Беларусь», проект Ф54. 1/ 030.

1. Божко И.В., Чарный Д.В. Исследование эффективности очистки воды от органических примесей импульсными разрядами // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 81-86.
2. Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш., Гайсин Ф.М. Струйный многоканальный разряд с электролитическими электродами в процессах обработки твердых тел. – Казань: Каз. гос. техн. университет, 2006. – 446 с.
3. Жилинский В.В., Дроздович В.Б., Иванова Н.П., Жданок С.А. Гальваноплазменные процессы в сульфатных и иодидных водных средах // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2010. – № 1. – С. 12-15.
4. Месарош Л.В. Фізика процесів у низькотемпературній лазерній і газорозрядній плазмі алюмінію, олова та повітря. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка. – Ужгород: ДВНЗ «Ужгородський національний університет», 2013. – 173 с.
5. Мустафин Т.Б., Гайсин Ал.Ф. Многоканальный разряд между струйным электролитическим анодом и твердотельным катодом // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49. – № 4. – С. 634-637.
6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Москва: Наука, 1992. – 536 с.
7. Сироткин Н.А., Хлюстова А.В., Максимов А.И. Численное моделирование состава газовой фазы в тлеющем разряде с электролитным катодом // Электронная обработка материалов. – 2014. – Т. 50. – № 4. – С. 42–48.
8. Шуаибов А.К., Чучман М.П., Месарош Л.В. Характеристики тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью воды // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – Вып. 6. – С. 60-64.
9. Шуаибов А.К., Чучман М.П., Козак Я.Ю. Электрические характеристики тлеющего разряда в воздухе с электролитическим катодом на основе сульфата меди // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 41-44.
10. Andre P., Barinov Yu., Faure C., Kaplan V., Lefort A., Skol'nik S., and Vacher D. Experimental study of discharge with liquid non-metallic (tap-water) electrodes in air at atmospheric pressure // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Vol. 34. – No 24. – Pp. 3456-3465.
11. Bruggeman P., Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – 053001 (28 p).

УДК: 537.525 + 539.19

## ГУСТИНА ЕЛЕКТРОНІВ В ОДНОКАНАЛЬНОМУ ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ НА ПОВЕРХНЮ ДИСТИЛЬОВАНОЇ ВОДИ

Шуаїбов О.К., Месарош Л.В., Чучман М.П.  
Ужгородський національний університет,

вул. Підгірна, 46, Ужгород, 88000, Україна. e-mail: [shuaibov@i.ua](mailto:shuaibov@i.ua)

*Наведено залежності питомої електричної потужності тліючого розряду над поверхнею дистильованої води, площі катодної плями і поперечного перерізу позитивного стовпа від величини струму розряду. Виконано оцінки максимальної густини електронів у катодній частині розряду і його позитивному стовпі при струмах 10-32 мА. Максимальна густина електронів може досягати  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> у катодній частині тліючого розряду, а у позитивному стовпі вона не перевищуватиме  $2 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Бібл. 11, рис. 3.*

**Ключові слова:** густина електронів, тліючий розряд, дистильована вода, питома електрична потужність тліючого розряду, площа катодної плями, площа поперечного перерізу позитивного стовпа.

## THE CONCENTRATION OF ELECTRONS IN THE ONE-CHANNEL ATMOSPHERIC PRESSURE GLOW DISCHARGE PLASMA TO THE SURFACE OF DISTILLED WATER

Shuaibov A.K., Mesarosh L.V., Chuchman M.P.

Uzhgorod National University,

str. Pidhirna, 46, Uzhgorod, 88000, Ukraine. e-mail: [shuaibov@i.ua](mailto:shuaibov@i.ua)

*The discharge current dependences of the specific electrical power of the glow-discharge above the distilled water surface, the cathode spot area and area of cross-section of positive column has been investigated. For currents up to 32 mA, the discharge exists in the form of a single homogeneous channel. When the current is increased to increase in the cross-section of positive column to 22 mm<sup>2</sup> was observed. The cathode spot area decreases from 14 (I = 10 mA) to 9.5 mm<sup>2</sup> (I = 17-32 mA). At the current increasing from 12 to 32 mA the electric power of discharge was increased linearly from 15 to 32 W. The maximum value of the average volumetric density of electric discharge power is achieved at a current of 32 mA and consist of 0,35 W/mm<sup>3</sup>. Increasing of current from 12 to 16 mA give decreasing of discharge volume from 73 to 65 mm<sup>3</sup>, and the current rise from 22 to 32 mA linearly increases discharge volume from 65 to 80 mm<sup>3</sup>. The maximum value of electron concentration was estimated in the cathode spot area and in positive column at 10-32 mA current. The electron concentration consists up to  $n_e = 10^{13}$  cm<sup>-3</sup> in the cathode spot. In positive column it consists less then  $2 \times 10^{11}$  cm<sup>-3</sup>. References 11, figures 3.*

**Key words:** concentration of electrons, glow-discharge, distilled water, specific electrical power of the glow-discharge, the cathode spot area, area of cross-section of positive column.

1. Bozhko I.V., Charnyi D.V. A study on effectiveness of water purification from organic impurities by pulse discharges // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 3. – Pp. 81-86. (Rus)
2. Gaisin A.F., Abdullin I.Sh., Gaisin F.M. Jet-Stream Multichannel Discharge with Electrolytic Electrodes in Processes of Solid State Treatment. – Kazan: Kazanskii Gosudarstvennyi Tekhnicheskii Universitet, 2006. – 446 p. (Rus)
3. Zhilinsky V.V., Drozdovich V.E., Ivanova N.P., Zhdanok S.A. Galvano-plasmic processes in sulfate- and iodide- containing water media // Izvestiia Natsionalnoi Akademii nauk Belarusi. Seriya Khimicheskikh Nauk. – 2010. – No 1. – Pp. 12-15. (Rus)
4. Mesarosh L.V. Physics processes in low-temperature laser plasma and gas discharge of aluminum, tin and air. PhD degree applications thesis in physical and mathematical sciences degree of specialty 01.04.04 – Physical Electronics. – Uzhhorod: SHES «Uzhhorodskii Natsionalnyi Universitet», 2013. – 173 p. (Ukr)
5. Mustafin T.V., Gaisin A.F. Multichannel discharge between jet electrolyte cathode and solid anode // Teplofizika Vysokikh Temperatur. – 2011. – Vol. 49. – No 4. – Pp. 615-619. (Rus)
6. Raizer Yu.P. Gas Discharge Physics. – Moskva: Nauka, 1992. – 536 p. (Rus)
7. Sirotkin N.A., Khlyustova A.V., Maksimov A.I. Numerical simulation of the gas phase composition in a glow discharge with an electrolyte cathode // Elektronnaia Obrabotka Materialov. – 2014. – Vol. 50. – No 4. – Pp. 323-329.
8. Shuaibov A.K., Chuchman M.P., Mesarosh L.V. Characteristics of a glow discharge in atmospheric pressure air over the water surface // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. – 2014. – Vol. 59. – No 6. – Pp. 847-851. (Rus)
9. Shuaibov A.K., Chuchman M.P., Kozak Ya.Yu. Electrical characteristics of glow discharge with electrolytic cathode based on copper sulphate in the air // Uspekhi Prikladnoi Fiziki. – 2014. – Vol. 2. – No 1. – Pp. 41-44. (Rus)
10. Andre P., Barinov Yu., Faure C., Kaplan V., Lefort A., Skolnik S., Vacher D. Experimental study of discharge with liquid non-metallic (tap-water) electrodes in air at atmospheric pressure // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Vol. 34. – No 24. – Pp. 3456-4365.
11. Bruggeman P., Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – 053001 (28 p).

Надійшла 20.11.2015

Остаточний варіант 04.02.2016