



УДК 533.9.07; 537.523

А. Н. Рамазанов, Д. К. Кострин, В. Д. Гончаров  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. А. Лисенков  
Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)

## Исследование вольт-амперных характеристик газового разряда, поддерживаемого в парах жидкости при атмосферном давлении

Представлены результаты исследования характеристик газового разряда, существующего на воздухе атмосферного давления в разрядной ячейке с жидким катодом. Приведены вольт-амперные характеристики при различных условиях существования разряда: расстоянии между электродами, различных толщинах слоя жидкости и площади металлического катода. Показано влияние взаимного расположения электродов в разрядной ячейке, а также температуры и проводимости жидкости на характеристики газового разряда.

### Газовый разряд, вольт-амперные характеристики, пары жидкости, конструкция электродов

Исследование характеристик и возможностей применения разряда, в котором в качестве одного из электродов используется жидкость, представляет значительный интерес [1]–[5]. Использование такого разряда позволяет формировать сильно неравновесную плазму с высокой концентрацией химически активных радикалов не только при использовании системы подачи газовой смеси, но и в воздухе при атмосферном давлении. Эффективное применение разрядов подобного типа требует дополнительного исследования их вольт-амперных характеристик (ВАХ) с целью оптимизации параметров конструкции разрядной ячейки [6], [7].

В работе исследовалась система [8], [9], состоящая из острейного вольфрамового анода  $1$  и медного катода  $3$ , имеющего форму пластины и погруженного под слой жидкости  $4$ , выполняющей функции распределенного катода (рис. 1). Между анодом  $1$  и поверхностью жидкости  $4$ , формируется плазменный столб газового разряда  $5$ , основанием которого является катодное пятно  $6$ . Напряжение на катод  $3$  подается через изолированный токовый ввод  $2$ .

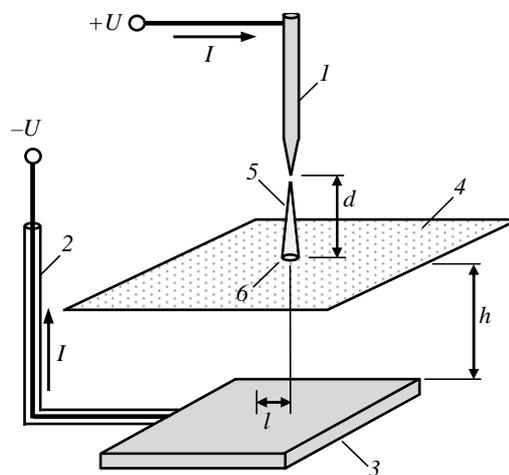


Рис. 1

Для исследования характеристик разряда была разработана высоковольтная схема, позволяющая варьировать частоту следования импульсов  $f$  в диапазоне 15...50 кГц, при напряжении  $U = 0...3.5$  кВ. Анод, представляющий собой стержень из вольфрама диаметром 4 мм, заостренный под углом около  $30^\circ$ , отделен от жидкости воздушным зазором толщиной  $d$ , в котором возникает газовый разряд при приложении высокого

напряжения. При использовании подобной системы питания жидкость играет роль распределенного резистивно-емкостного балласта. Расстояние от анода до поверхности жидкости  $d$  изменялось в диапазоне 3...10 мм. В случае, когда это особо не оговаривается, в экспериментах толщина слоя жидкости над металлическим катодом  $h$  была равна 4 мм.

На рис. 2 продемонстрированы ВАХ исследуемой системы (газового разряда и распределенного жидкостного балласта) при различных расстояниях  $d$  между анодом и поверхностью жидкости (1 – 3 мм; 2 – 4 мм; 3 – 5 мм; 4 – 6 мм). Данные результаты, получены при неизменной частоте  $f = 40$  кГц. Аналогичные результаты наблюдались во всем исследуемом диапазоне частот.

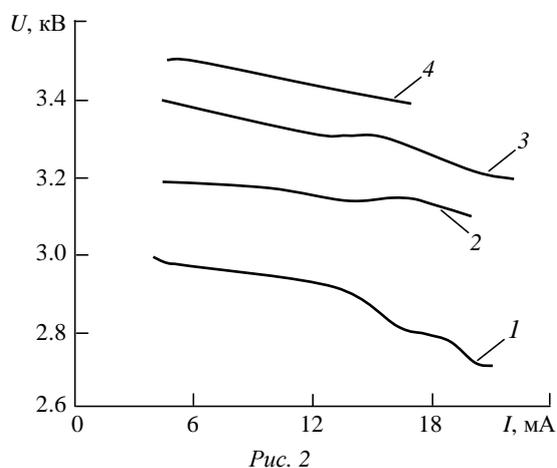


Рис. 2

При  $d = 4...6$  мм разряд существовал в определенных диапазонах частот и напряжений. Например, при  $d = 5$  мм частотный диапазон горения разряда составлял 19.5...50 кГц. При  $d = 3$  мм разряд поддерживался во всем диапазоне частот и напряжений. Высокая яркость свечения газового разряда наблюдается при токах, превышающих 15...20 мА.

ВАХ газового разряда при различной толщине слоя жидкости  $h$  над металлическим катодом представлены на рис. 3 ( $d = 4$  мм; при  $h$ : 1 – 4 мм; 2 – 5 мм; 3 – 6 мм; 4 – 7 мм). По мере изменения расстояния между поверхностью жидкости и катодом ВАХ разряда становится более крутопадающей. В результате наблюдается уменьшение вкладываемой в разряд энергии, а следовательно, и яркости его свечения.

Увеличение тока, протекающего в разрядном промежутке, приводит к изменению формы разряда [10]: от конусообразной, характеризующейся равномерным распределением тока по поверхности жидкости, до эллипсообразной, в которой

наблюдается «привязка» разряда к определенной области на поверхности жидкости. В этом случае распределенного сопротивления слоя жидкости оказывается недостаточно для ограничения тока, и неустойчивости, свойственные тлеющему разряду, приводят к его контракции и образованию на поверхности жидкости явно выраженного катодного пятна [11]. Это пятно быстро перемещается по поверхности жидкости.

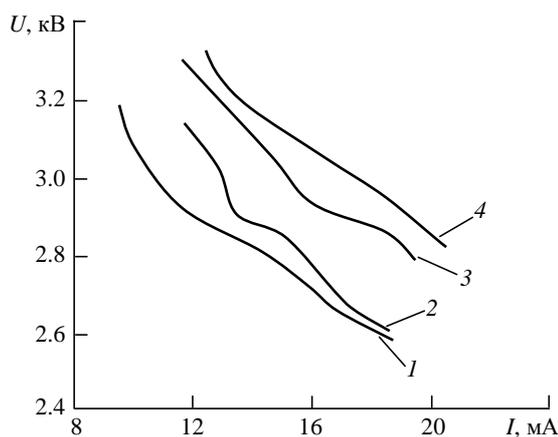


Рис. 3

Уменьшение первоначальной площади медного катода (14 см<sup>2</sup>) снижает напряжение зажигания разряда (рис. 4, где кривые соответствуют следующим долям от начального значения площади катода: 1 – 100%; 2 – 75%; 3 – 50%; 4 – 25%), что связано с уменьшением сопротивления объема жидкости, через который протекает ток.

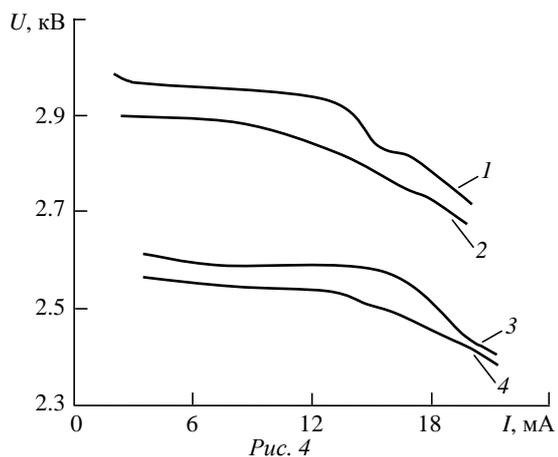


Рис. 4

Аналогичные результаты наблюдаются при смещении анода относительно катода (см. рис. 1). Сдвиг  $l = 0$  см соответствует расположению острейшего анода ровно над центром медного катода (рис. 5, при  $l$ : 1 – 10 см; 2 – 6 см; 3 – 4 см; 4 – 0 см). Ассиметричное расположение анода относительно катода приводит к перераспределению кон-

фигурации силовых линий поля, что приводит к затруднению существования разряда и увеличению необходимого напряжения для его поддержания.

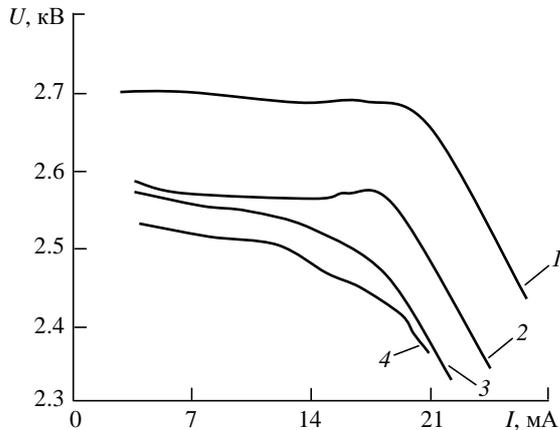


Рис. 5

На ВАХ газового разряда существенное влияние оказывает как электропроводность жидкости, так и ее температура. Изменение электрических свойств жидкости достигалось добавлением поваренной соли. Графики зависимостей при двух различных взаимных положениях электродов и разной электропроводности жидкости представлены на рис. 6 (при  $l$ : 1 – 6 см; 2 – 0 см; 3 – 6 см; 4 – 0 см). Зависимости 1 и 2 получены для жидкости, использованной во всех ранее проведенных экспериментах, а 3 и 4 – для жидкости, в которую добавлена поваренная соль. Очевидно, что с ростом электропроводности жидкости и повышением числа ионов в ее парах ВАХ смещаются в сторону меньших напряжений возникновения разряда. Также наблюдается более резкий вид зависимостей с существенным перегибом характеристики в области больших токов.

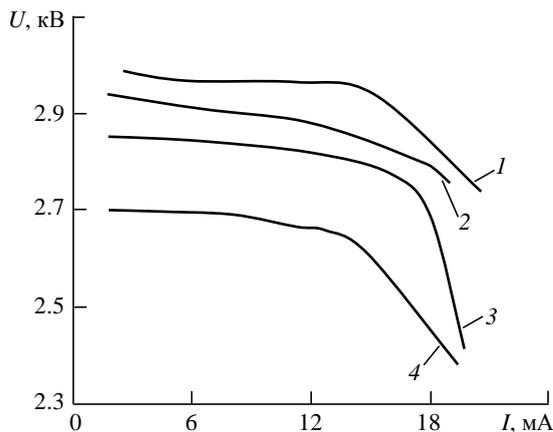


Рис. 6

Целью следующего эксперимента было выявление влияния конструкции и материала острия на ВАХ газового разряда. Был использован тот же вольфрамовый стержень, что и в предыдущих

экспериментах, и, для сравнения, более тонкий стержень диаметром 2 мм, изготовленный из нихромовой проволоки. Стоит отметить, что работа выхода для вольфрама и нихрома имеет достаточно близкое значение и изменение материала анода в данном случае не должно оказать существенного влияния на ВАХ разряда. Уровень жидкости  $h$  в данном эксперименте был равен 5 мм, а расстояние  $d = 3$  мм. Полученные зависимости представлены на рис. 7 (1 – вольфрамовый стержень; 2 – нихромовая проволока). Использование более тонкого острия с меньшим радиусом кривизны приводит к смещению ВАХ газового разряда в сторону меньших напряжений и токов за счет повышения напряженности электрического поля в области острия.

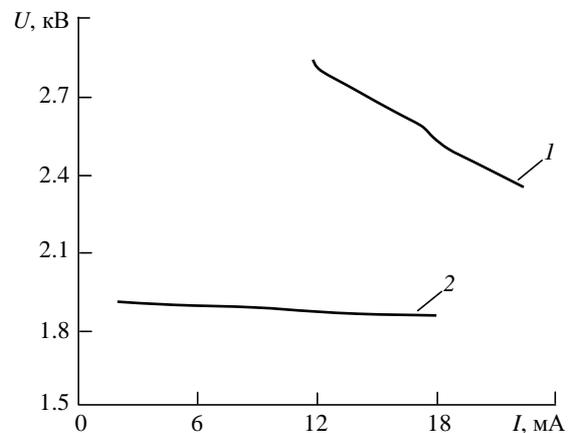


Рис. 7

ВАХ газового разряда, полученные при различных температурах жидкости, представлены на рис. 8: 1 – 20 °С; 2 – 30 °С; 3 – 40 °С; 4 – 50 °С. Увеличение температуры воды приводит к образованию насыщенного пара и увеличению числа гидроксильных ионов, благодаря которым уменьшается напряжение, при котором возникает разряд.

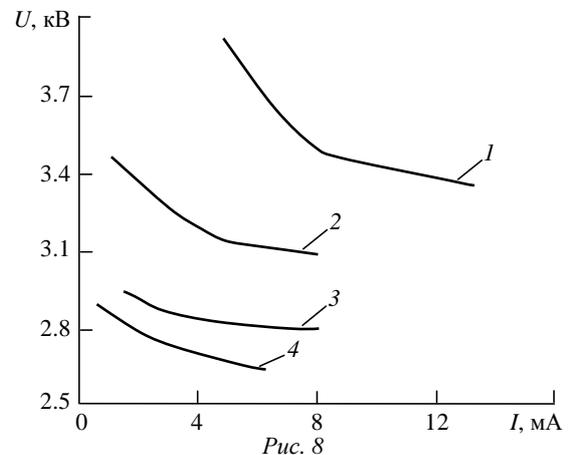


Рис. 8

В процессе исследований с помощью оптического спектрометра осуществлялся контроль спектров излучения плазмы газового разряда [12]–[14]. Спектрограммы во всех экспериментах оставались практически неизменными вне зависимости от параметров разрядной системы. Изменялась только фиксируемая интенсивность спектральных линий, что связано с различной мощностью, выделяемой в процессе разряда при разных параметрах системы.

Результаты проведенных экспериментов показали, что для достижения оптимальных параметров рассмотренной разрядной системы следует учитывать следующие факторы:

1. Расстояние между анодом и поверхностью жидкости должно составлять порядка 3 мм. При больших расстояниях увеличивается напряжение поддержания разряда, при меньших – повышается вероятность замыкания металлического электрода и поверхности жидкости за счет колебаний, возникающих на ее поверхности под воздействием плазменного потока.

2. Оптимальная толщина слоя жидкости составляет 4 мм, что обеспечивает наименьшее напряжение возникновения разряда. При большей толщине слоя возрастает объемное сопротивление слоя жидкости, при меньшей – уменьшается испарение жидкости и, как следствие, концентрация ионов в воздухе, что также приводит к увеличению напряжения возникновения разряда.

3. Уменьшение площади металлического анода приводит к смещению ВАХ газового разряда в сторону более низких напряжений. Данный факт связан с уменьшением сопротивления жидкости вследствие уменьшения объема, через который проходит электрический ток.

4. Сдвиг острейного анода относительно центра катода приводит к увеличению напряжения зажигания газового разряда в результате перераспределения конфигурации силовых линий поля.

5. Увеличение электропроводности жидкости уменьшает напряжение поддержания разряда за счет понижения сопротивления жидкостного катода.

6. Уменьшение диаметра и радиуса кривизны острейного электрода понижает напряжение, требуемое для поддержания разряда. Однако, с другой стороны, в этом случае также уменьшается и уровень максимальной энергии, которая может быть передана разряду.

7. Увеличение температуры жидкости смещает ВАХ газового разряда в сторону более низких напряжений, за счет повышения испарения жидкости и, как следствие, увеличения концентрации ионов в воздушном промежутке между острейным анодом и жидким катодом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Webb M. R., Hieftje G. M. Spectrochemical analysis by using discharge devices with solution electrodes // Analytical chemistry. 2009. Vol. 81, № 3. P. 862–867.

2. Соколов М. А., Брытов И. А. Использование электрического разряда в жидкости для эмиссионного анализа // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2–3. С. 100–104.

3. Mezei P., Cserfalvi T. Electrolyte cathode atmospheric glow discharges for direct solution analysis // Applied spectroscopy re-views. 2007. Vol. 42. P. 573–604.

4. Кострин Д. К. Исследование возможности экспресс-контроля состава воды оптическим спектрометром при использовании разряда в жидкости // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 7. С. 15–19.

5. Анализ возможности создания компактной спектрометрической системы экологического мониторинга водных ресурсов / Д. К. Кострин, А. Н. Рамазанов, Н. Н. Потрахов, А. А. Ухов // Технологии техно-сферной безопасности. 2015. № 6. С. 222–229.

6. Рамазанов А. Н., Кострин Д. К. Разработка и исследование спектрометрической системы для анали-

за состава воды // Современная техника и технологии. 2015. № 6. С. 89–92.

7. Рамазанов А. Н., Кострин Д. К. Разрядные системы для спектрохимического анализа // Современная техника и технологии. 2015. № 7. С. 42–46.

8. Тлеющий разряд на воздухе с жидким неметаллическим катодом / А. Н. Рамазанов, Д. К. Кострин, А. А. Ухов, А. А. Лисенков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 1. С. 3–6.

9. Characteristics of a glow discharge maintained in the vapors of a liquid / A. N. Ramazanov, D. K. Kostrin, V. D. Goncharov, A. A. Lisenkov // J. of Physics: Conf. Series. 2016. Vol. 729. P. 012004.

10. Шуаибов А. К., Чучман М. П., Месарош Л. В. Характеристики тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью воды // Журн. техн. физики. 2014. Т. 84, № 6. С. 60–64.

11. Cathode Spots of Vacuum Arc Discharges: Motion Control on the Working Surface / Yu. A. Bystrov, D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov, N. Z. Vetrov // Vakuum in Forschung und Praxis. 2015. Vol. 27, № 2. P. 22–25.

12. Use of compact spectrometer for plasma emission qualitative analysis / A. A. Uhov, V. A. Gerasimov, D. K. Kostrin, L. M. Selivanov // J. of Physics: Conf. Series. 2014. Vol. 567. P. 012039.

13. Особенности анализа состава плазмы с помощью малогабаритного оптического спектрометра

/ А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 3. С. 7–10.

14. Kostrin D. K., Uhov A. A., Lisenkov A. A. Optical spectrometry in the diagnosis of ion-plasma processes: Control of the coating deposition process and thickness // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2016. Vol. 28, № 3. P. 34–37.

A. N. Ramazanov, D. K. Kostrin, V. D. Goncharov,  
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

A. A. Lisenkov

*Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (IPME RAS)*

## RESEARCH OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE GAS DISCHARGE MAINTAINED IN THE VAPORS OF A LIQUID AT ATMOSPHERIC PRESSURE

*Results of the research of glow discharge characteristics in atmospheric pressure air in the discharge cell with a liquid cathode are shown in this work. Current-voltage characteristic of such system at different distances between electrodes, various thicknesses of the liquid layer and the cathode surface area are given. Effect of the relative position of the electrodes in a discharge cell, and also temperature and conductivity of the liquid are presented.*

**Gas discharge, volt-ampere characteristic, a pair of fluid, electrode design**