



УДК 537.523

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

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

Тлеющий разряд на воздухе с жидким неметаллическим катодом

Рассмотрен тлеющий разряд на воздухе атмосферного давления в разрядной ячейке с жидким катодом. Приведены вольт-амперные характеристики такой системы при различных расстояниях между электродами. Продемонстрирована спектрограмма излучения плазмы тлеющего разряда.

Тлеющий разряд, жидкий электрод, вольт-амперная характеристика, излучение плазмы

В последние годы все больший научно-исследовательский интерес вызывает газовый разряд, существующий на воздухе, в котором в качестве одного или сразу двух электродов выступает жидкость [1], [2]. По классификации газовых разрядов данный тип относят к тлеющему разряду, т. е. самостоятельному электрическому разряду с холодным катодом, особенностью которого является наличие слоистой структуры. Изменение состава газовой смеси и давления в межэлектродном промежутке влияет как на напряжение возникновения разряда, так и на плотность тока и условия его поддержания.

Диапазон областей, где может быть использован газовый разряд с жидкими электродами, достаточно широк. Определяющее применение сильнонеравновесной плазмы подобного разряда – это воздействие на поверхность воды: очистка, достигаемая за счет ослабления связей органических соединений, и контроль состава жидкости [3], [4].

Целью работы являлось исследование газового разряда, существующего при атмосферном давлении, в воздухе при наличии одного жидкого электрода.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. В работе исследовалась электродная система «металлический анод–жидкий катод». Металлический катод погружен в жидкость, поверхность которой может рассматриваться как

жидкий катод, а анод отделен от жидкости воздушным промежутком, в котором и возникает тлеющий разряд при приложении высокого напряжения. Способность воды проводить электрический ток связана с диссоциацией молекулы воды на ионы, являющиеся проводниками электрического тока: $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ или $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$. Ион гидроксония H_3O^+ , в свою очередь, может объединяться с другими молекулами воды, образуя гидратированные ионы, например: $(\text{H}_5\text{O}_2)^+$, $(\text{H}_7\text{O}_3)^+$, $(\text{H}_9\text{O}_4)^+$.

Формируемый разряд в первоначальный момент времени следует характеризовать как импульсно-периодический, который через 10...20 с переходит в стационарный режим, характеризующийся наличием яркого свечения и зоны, охваченной разрядом на поверхности катода и называемой по аналогии с привязкой существования вакуумно-дугового разряда с интегрально-холодным катодом катодным пятном [5]. Катодное пятно обеспечивает интенсивное испарение воды, в связи с чем спектральные характеристики разряда определяются как воздушными компонентами, так и системой полос излучения продуктов распада молекул воды.

Конструкция разрядной системы приведена на рис. 1. Тлеющий разряд возбуждается в стеклянной кювете 1 и существует между заострен-

ным вольфрамовым электродом, размещенным над поверхностью воды и выполняющим функции анода 2, и металлическим электродом 3 (катод), находящимся на глубине до 3 см от ее поверхности и определяющим потенциал жидкости. Для зажигания разряда была разработана высоковольтная импульсная схема, позволяющая варьировать частоту следования импульсов f от 15 до 50 кГц, при напряжении U от 0 до 3.5 кВ. Расстояние от анода 2 до поверхности жидкости d изменялось в диапазоне 3...10 мм. При расстоянии между электродами $d < 3$ мм возникала вероятность замыкания промежутка, а при $d > 6$ мм, при указанных условиях, разряд не зажигался.

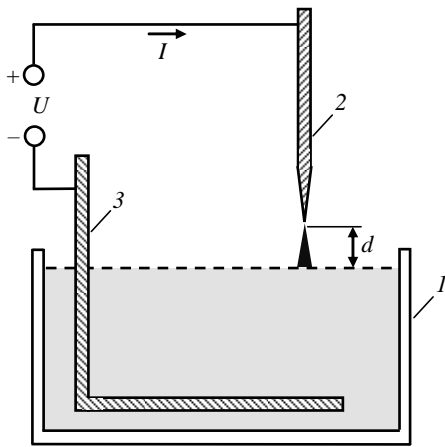


Рис. 1

Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с одним жидким электродом при различных расстояниях d между анодом и поверхностью жидкости приведены на рис. 2. Условия возникновения газового разряда зависят от давления газа и расстояния между электродами и характеризуются кривой Пашена. При $d = 4...6$ мм разряд горел только 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.

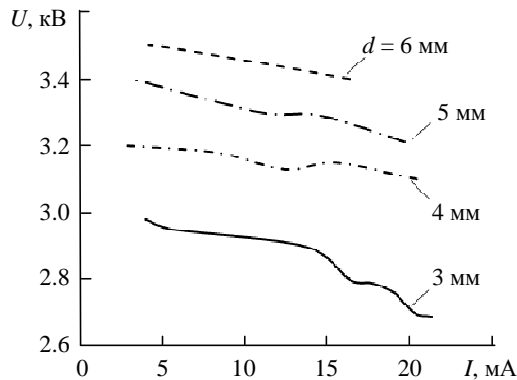


Рис. 2

В качестве примера на рис. 3 приведены осциллограммы напряжения и тока тлеющего разряда при $d = 4$ мм и $f = 39.5$ кГц. Высокая яркость свечения тлеющего разряда наблюдается при токах, превышающих 20 мА.

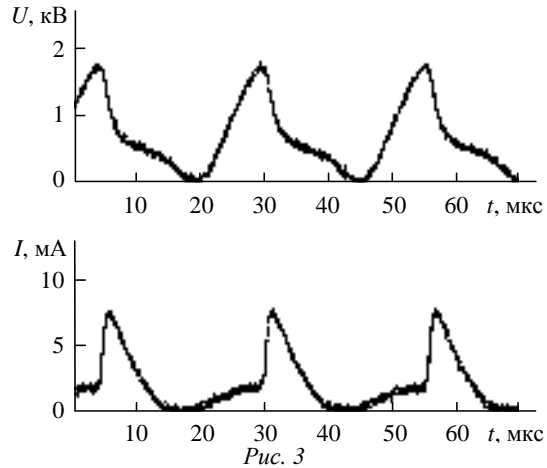


Рис. 3

По мере погружения катода относительно поверхности, за счет увеличения сопротивления электрической цепи напряжение зажигания разряда возрастает и наблюдается уменьшение яркости его свечения. Увеличение тока, протекающего в разрядном промежутке, приводит к изменению формы самого разряда – от конусообразной до эллипсообразной. Еще одной особенностью газового разряда в исследованной системе является интенсивное перемещение катодного пятна по поверхности жидкости в результате ее колебаний под воздействием потока плазмы. На рис. 4 приведена контрастная фотография разряда при $d = 4$ мм и $I = 20$ мА.

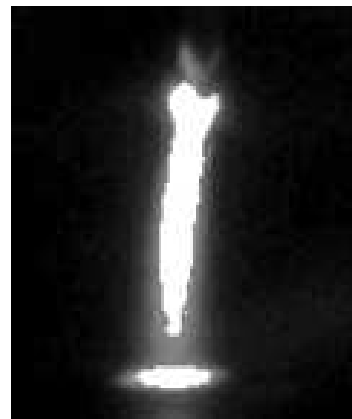


Рис. 4

Спектрограммы разряда атмосферного давления в воздухе между металлическим анодом и поверхностью жидкости снимались с помощью спектрометра ISM3600. При обработке полученных спектров излучения применялось программное обеспечение ASpect 2010 [6], [7]. В качестве исследуемой жидкости в данных экспериментах использовалась водопроводная вода.

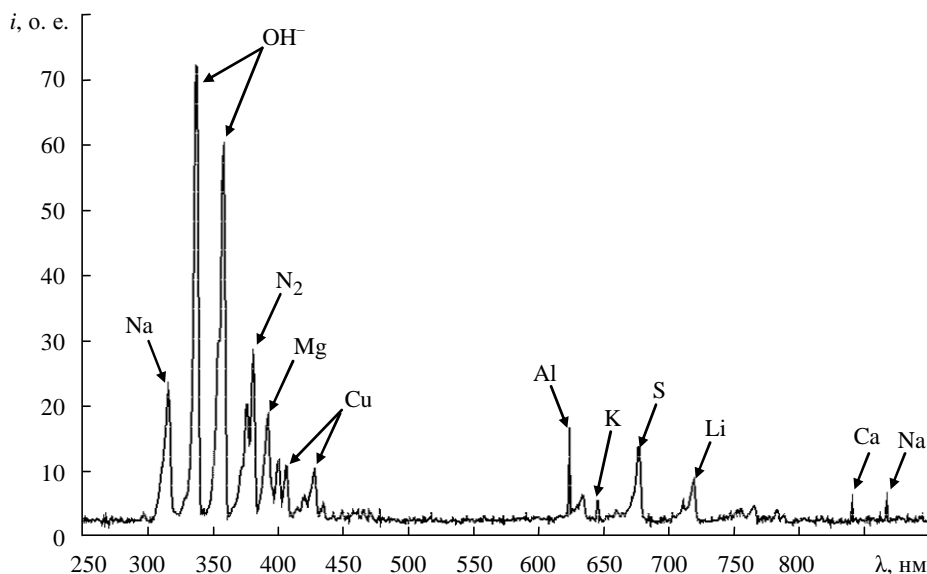


Рис. 5

На рис. 5 представлена спектрограмма (λ – длина волны; i – интенсивность излучения) тлеющего разряда с жидким катодом при расстоянии между анодом и поверхностью воды $d = 4$ мм и частоте питающего напряжения 30 кГц. Чувствительность спектрометра (время накопления) – 2 с.

Наиболее интенсивные спектральные линии излучения плазмы тлеющего разряда сконцентрированы в промежутке длин волн 300...400 нм и соответствует в основном гидроксильной группе OH^- , а также однозарядным ионам азота N^+ и кислорода O^+ , молекулярным азоту и кислороду.

В видимом диапазоне длин волн наблюдаются спектральные линии молекул лития, меди, калия, серы и алюминия. В диапазоне 800...1000 нм присутствуют пики, соответствующие кальцию и натрию.

Эффективность возбуждения спектральных линий разных элементов различна и зависит как от электрических параметров разряда, так и от

конструктивных характеристик разрядной ячейки и даже температуры жидкости. Таким образом, для оценки количественного содержания элементов в жидкости нужна предварительная калибровка по пробам с известным составом.

Значение расстояния между металлическим анодом и жидким катодом, при котором происходит устойчивое горение тлеющего разряда, лежит в диапазоне 3...6 мм. При расстоянии между электродами 3 мм разряд не гаснет при изменении частоты и напряжения в достаточно широких пределах, при этом изменяется только интенсивность свечения плазмы разряда.

Продолжением исследований в данной области является анализ эффективности возбуждения спектральных линий элементов, растворенных в жидкости, в зависимости от электрических параметров разряда, конструкции разрядной ячейки и ряда других факторов.

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. Рамазанов А. Н., Кострин Д. К. Разрядные системы для спектрохимического анализа // *Современная техника и технологии*. 2015. № 7. С. 42–46.
3. Mezei P., Cserfalvi T. Electrolyte cathode atmospheric glow discharges for direct solution analysis // *Applied spectroscopy reviews*. 2007. Vol. 42. P. 573–604.
4. Соколов М. А., Брытов И. А. Использование электрического разряда в жидкости для эмиссионного анализа // *Петерб. журн. электроники*. 2008. № 2–3. С. 100–104.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

A. N. Ramazanov, D. K. Kostrin, A. A. Uhov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

A. A. Lisenkov
Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (IPME RAS)

GLOW DISCHARGE IN AIR WITH LIQUID NONMETALLIC CATHODE

In the article the glow discharge in air with atmospheric pressure in the discharge cell with a liquid cathode is considered. Volt-ampere characteristics of such system at different distances between the electrodes are given. Spectrogram of radiation of glow discharge plasma is shown.

Glow discharge, liquid electrode, current-voltage characteristic, plasma radiation
