

Характеристики наносекундного разряда с жидким неметаллическим электродом в воздухе

* А. К. Шуаибов, А. Й. Миня, А. Л. Енеди, И. В. Шевера, З. Т. Гомоки, В. В. Данило

*Государственное высшее учебное заведение «Ужгородский национальный университет», ул. Пидгира, 46, г. Ужгород, 88000, Украина, *e-mail: alexander.shuaibov@uzhmu.edu.ua*

Приведены результаты разработки модуля сильноточного наносекундного разряда над поверхностью жидкости (дистиллированной воды и раствора этилового спирта). Исследованы электрические и оптические характеристики разряда. Определены условия зажигания разряда над жидкими средами на основе этилового спирта и дистиллированной воды и разряда между металлическим (лезвие) и жидким электродами. Эти разряды представляют интерес для использования в системах очистки воды (поверхности воды от органических пленок) и синтеза наночастиц (углерода).

Ключевые слова: наносекундный разряд, вода, спирт.

УДК 537.523.3

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается значительный интерес к плазменно-растворным технологиям, которые уже широко применяются для нанесения различных покрытий, очистки воды, стимулирования химических реакций и синтеза наноструктур [1–5]. Особое место среди жидкостей, которые используются в качестве одного из электродов или заполняющих межэлектродный промежуток, принадлежит органическим жидкостям (спирты и др.). Такие разрядные технологии перспективны для синтеза наноструктур углерода [6–8], получения водорода как нового вида топлива и синтез-газа (смесей водорода с оксидом углерода разного состава, которые широко используются в химической промышленности) [9]. Увеличение тока тлеющего разряда с жидкими электродами выше 100 мА требует применения систем охлаждения жидкости, а при токах, превышающих 1 А, тлеющий разряд переходит в многоканальную стадию, где его пространственные характеристики могут хаотически изменяться [10].

Для получения стабильных пространственных характеристик разряда в воздухе при токах в сотни ампер без существенного нагревания жидкости наиболее перспективным является применение сильноточного наносекундного разряда между системой острых электродов и поверхностью жидкости, который может устойчиво зажигаться в воздухе атмосферного давления без применения систем предыонизации [11, 12]. По механизму зажигания такие разряды можно отнести к разрядам, инициируемым пучком убегающих электронов и сопутствующим рентгеновским излучением. В [13] этот вид разряда предложено называть ОРИПЭЛ (объемный разряд, инициируемый пучком электронных

лаavin). В обзоре [14] подобный разряд назван сильноточной стримерной короной, хотя отличие этих разрядов и разрядов, описанных в работе [13], связано только с длительностью импульсов напряжения и формой металлических электродов. В [14] описана и слаботочная вспышечная корона в воздухе атмосферного давления, которая зажигалась между металлическим острием и поверхностью жидкости при токах, меньших 100 мА. Как видно из [13, 14], в настоящее время общепринятое название для сильноточного наносекундного разряда в сильнеоднородном электрическом поле (особенно когда один из электродов жидкостный) еще не установилось.

Подобные разряды являются мощными источниками УФ-излучения и сильных окислителей типа озона, атомов кислорода и радикалов гидроксила, которые проникают внутрь жидкостного электрода и могут обрабатывать довольно большие поверхности жидкости. По сравнению с подводными наносекундными разрядами у них значительно меньше эрозия металлического электрода и большой объем плазмы.

В работе [11] установлена высокая эффективность очистки воды от примесей наносекундного коронного разряда между системой острых и поверхностью раствора. Но такие важные характеристики этого типа разряда как оптические остались не исследованными. С технологической точки зрения может быть перспективной замена большого количества иголок на систему ножевых электродов (лезвий), что способствует увеличению однородности разряда. С позиции возможности синтеза наночуглерода представляют интерес исследования характеристик наносекундного разряда между ножевым электродом и раствором спирта в воде.

В настоящей работе приводятся результаты разработки лабораторного макета для получения

и исследования характеристик наносекундных разрядов в воздухе атмосферного давления в системах электродов, состоящих из набора металлических лезвий и жидкостных электродов на основе дистиллированной воды и ее смесей с этиловым спиртом.

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования основных характеристик наносекундного разряда с электродом на основе дистиллированной воды и ее растворов с этиловым спиртом была разработана экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис. 1. При исследовании перехода разряда над поверхностью жидкости непосредственно в разряд на ее поверхность использовался жидкий электрод на основе раствора дихлорида цинка в дистиллированной воде. Дополнительный интерес к обработке растворов солей цинка в воздухе мощным наносекундным разрядом связан с перспективой синтеза наноструктур на основе оксидов цинка в макроскопическом количестве, которые востребованы современной микронаноэлектроникой.

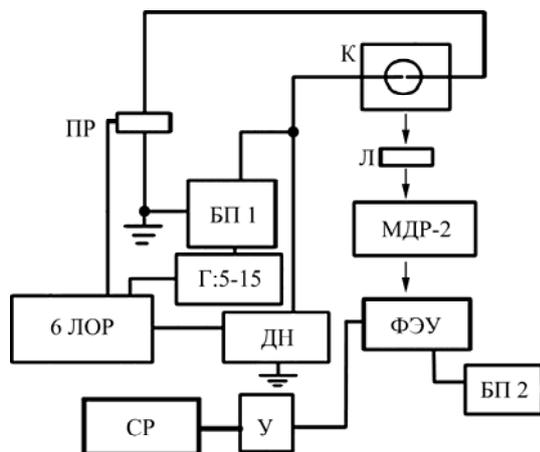


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: БП 1 – блок питания разряда; К – разрядная ячейка; Л – собирающая линза; МДР-2 – спектрометр; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; БП 2 – блок питания фотоумножителя ВС-22; У – усилитель; СР – аналого-цифровая система регистрации или КСП-4 – самописец; ПР – пояс Роговского; ДН – делитель напряжения; Г5-15 – генератор импульсов; 6 ЛОР – шестиканальный широкополосный осциллограф.

Установка состояла из разрядной ячейки с жидким электродом, высоковольтного модулятора импульсов наносекундной длительности, системы регистрации пространственных, электрических и оптических характеристик. Использовались два варианта системы электродов.

В первом случае применялись набор лезвий и сплошной пластинчатый электрод, установленный в жидкости так, что его поверхность нахо-

дилась ниже ее уровня на 3–5 мм. Расстояние между лезвиями и поверхностью жидкости – в диапазоне 3–12 мм. Электрод, который размещался над поверхностью воды, состоял из 15 нержавеющей лезвий толщиной 0,1 мм. Площадь рабочей поверхности электрода из лезвий равнялась $37 \times 22 \text{ мм}^2$. Нижний электрод изготовлен из нержавеющей стали и имел размеры $60 \times 40 \times 14 \text{ мм}$ [12].

Второй вариант системы электродов предназначался для зажигания разрядов над поверхностью жидкости и состоял из двух лезвий, установленных перпендикулярно к поверхности жидкости (рис. 2). Расстояние между острой кромкой каждого из лезвий и поверхностью жидкости составляло 3–5 мм. Каждое из лезвий могло вращаться вокруг металлических осей, соединенных с правой частью каждого лезвия. На эти оси подавалось высокое напряжение положительной и отрицательной полярности.

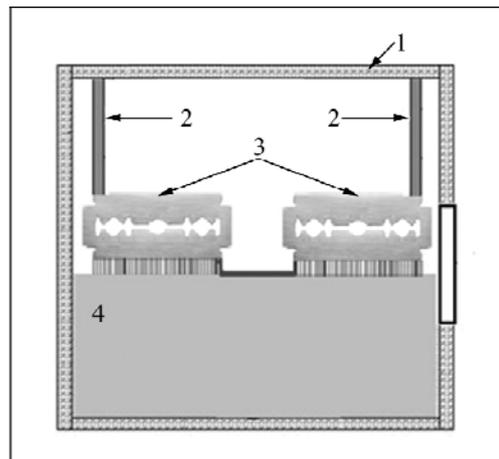


Рис. 2. Конструкция разрядной ячейки с поворотными ножевыми электродами: 1 – кювета с раствором; 2 – система поворота и регулировки ножевых электродов из лезвий; 3 – лезвия; 4 – жидкий электрод.

Импульсно-периодический наносекундный разряд зажигался в воздухе атмосферного давления с помощью источника импульсов высокого напряжения с резонансной перезарядкой накопительного конденсатора емкостью 1,54 нФ и коммутатора – водородный тиратрон – ТГИ1 1000/25. Общая длительность импульса напряжения достигала 150 нс. Амплитуда импульсов напряжения одной полярности на выходе модулятора могла варьироваться в диапазоне 10–25 кВ. Амплитуда основного максимума импульса тока достигала 100–170 А. Частота следования импульсов напряжения могла варьироваться в диапазоне 35–1000 Гц.

Пространственные характеристики разрядов регистрировались фотоаппаратом. Анализ излучения плазмы разряда проводился в спектральном диапазоне 200–660 нм с использованием монохроматора МДР-2 и фотоумножителя

ФЭУ-106. Сигнал с фотоумножителя поступал на усилитель постоянного тока, а в дальнейшем обрабатывался с помощью аналого-цифрового преобразователя и персонального компьютера. Для определения энерговклада в плазму регистрировались импульсы напряжения и тока разряда по методике, описанной в [11]. Импульсная мощность наносекундного разряда рассчитывалась путем графического умножения осциллограмм напряжения на разрядном промежутке и тока. Полная энергия, которая вкладывалась в плазму разряда, рассчитывалась путем графического интегрирования импульсной мощности по времени.

Регистрация осциллограмм импульсов напряжения и тока проводилась с использованием малоиндуктивного емкостного делителя, пояса Роговского и широкополосного шестиканального импульсного осциллографа БЛОР-04. Все осциллограммы регистрировались с помощью фотоаппарата, а в дальнейшем оцифровывались. Синхронизация импульсов источника питания разряда с запуском импульсного осциллографа осуществлялась генератором импульсов Г5-15.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При использовании системы электродов, состоящей из набора лезвий и металлического электрода, погруженного в жидкость, разрядная область состояла из 15 сравнительно однородных плазменных листов, которые касались поверхности жидкости и покрывали площадь $40 \times 25 \text{ мм}^2$. С увеличением частоты следования пачек импульсов до 1000 Гц однородность и интенсивность излучения разряда увеличивались (рис. 3). В диапазоне частот следования 200–1000 Гц, кроме основного сильноточного разряда, наблюдалось формирование диффузного разряда в периферийных зонах острейшего электрода (системы лезвий).

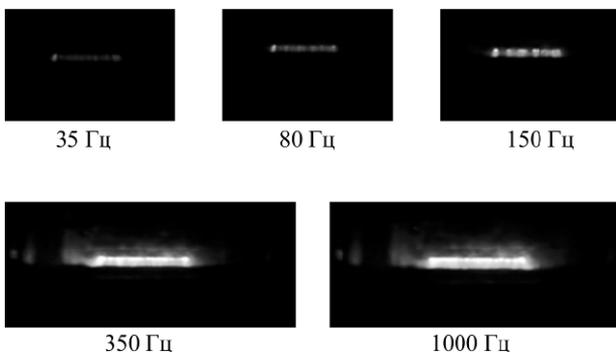


Рис. 3. Фотографии наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления между электродом из пятнадцати лезвий и поверхностью дистиллированной воды при межэлектродном расстоянии 7 мм, величине зарядного напряжения рабочего конденсатора $U = 13 \text{ кВ}$ и разных частотах следования импульсов.

Пространственные характеристики наносекундного разряда в системе электродов «лезвие-лезвие», установленной над поверхностью дистиллированной воды и раствора дихлорида цинка в воде, приведены на рис. 4. Основное отличие этих жидких сред в величине сопротивления. Известно, что сопротивление электролита значительно меньше сопротивления дистиллированной воды [15]. При удалении острий лезвий от поверхности воды на расстояние 3 мм зажигался разряд в воздухе между боковыми кромками лезвий как для воды, так и для электролита (верх рис. 4). При увеличении этого расстояния до 10 мм зажигался разряд по поверхности дистиллированной воды, то есть разряд между лезвиями замыкался над поверхностью дистиллированной воды. При использовании раствора соли поверхностный разряд отсутствовал, а разряд между лезвиями в этом случае горел в виде тонких плазменных листов между кромками лезвий и поверхностью электролита по всей длине лезвий. Аналогичная картина наблюдалась и при увеличении расстояния между острыми кромками и поверхностью воды и электролита до 80 мм. Свечение разряда было сине-фиолетовым и заполняло почти весь промежуток между кромками лезвий и поверхностью жидкости.

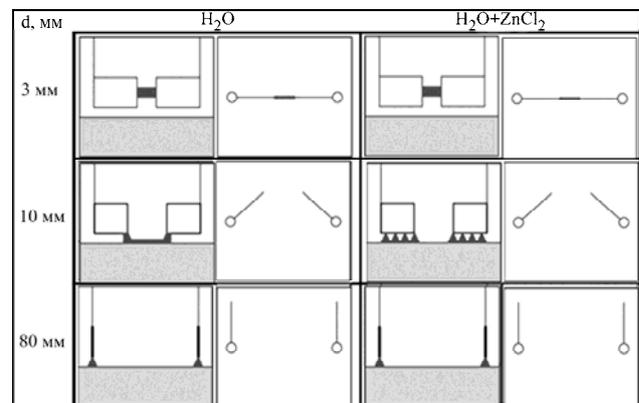


Рис. 4. Пространственные характеристика наносекундных разрядов в системе электродов «лезвие-лезвие», которые зажигались над поверхностью дистиллированной воды и 5% раствора соли ZnCl_2 в дистиллированной воде при $U = 13 \text{ кВ}$ и частоте следования импульсов $f = 80 \text{ Гц}$ (d – расстояние между краями лезвий).

Электрические характеристики наносекундных разрядов в воздухе атмосферного давления, которые зажигались в системе электродов типа «лезвие-лезвие» над поверхностью дистиллированной воды и раствора спирта в воде, представлены на рис. 5 и 6. Аналогичные характеристики для наносекундного разряда между системой из лезвий и поверхностью дистиллированной воды были близкими к результатам, приведенным на рис. 4 и 5. Так, для этого типа системы электродов максимальная импульсная мощность разряда

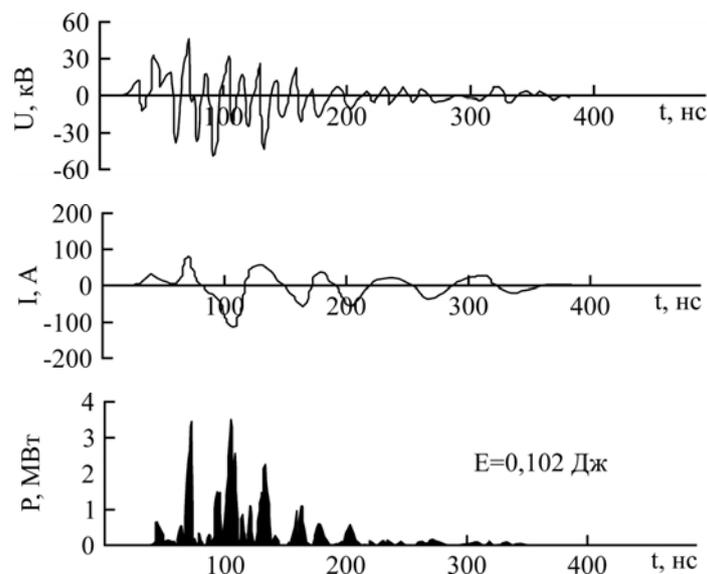


Рис. 5. Электрические характеристики (импульсы напряжения, тока и импульсная мощность, которая вносится в плазму) наносекундного разряда над поверхностью дистиллированной воды в системе электродов «лезвие-лезвие» при расстоянии между лезвиями $d = 25$ мм ($U = 13$ кВ и $f = 80$ Гц).

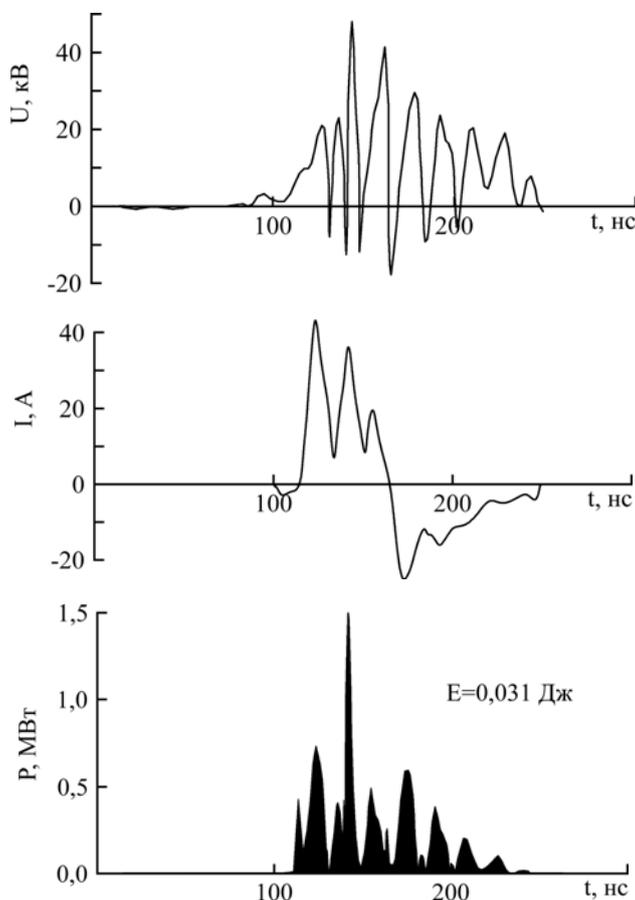


Рис. 6. Электрические характеристики наносекундного разряда над поверхностью раствора этилового спирта (20%) в дистиллированной воде (система электродов «лезвие-лезвие» при $d = 25$ мм; $U = 13$ кВ и $f = 80$ Гц).

достигала 1,8 МВт, а энергия разряда составляла 30 мДж.

При расстоянии между лезвиями $d = 25$ мм величина импульсной мощности разряда равнялась 2–4 МВт. Максимальный энерговклад в разряд достигался на протяжении времени примерно с 70 до 120 наносекунд от начала развития разрядных процессов. При увеличении d в

последовательности 3 – 10 – 25 – 80 мм полная энергия энерговклада в плазму изменялась в последовательности 190 – 40 – 102 – 50 мДж. Эти результаты показывают, что максимальный энерговклад достигается при $d = 3$ мм, когда разряд горит между лезвиями, не касаясь поверхности воды. Энерговклад для поверхностного разряда уменьшается примерно в четыре

раза ($d = 10$ мм). При переходе от поверхностного разряда до разряда между кромками лезвий и поверхностью воды энергозатраты увеличивались до расстояния $d = 25$ мм (102 мДж), а при дальнейшем увеличении расстояния между лезвиями (до 80 мм) он значительно уменьшался (50 мДж).

Аналогичное поведение энергозатраты наблюдалось и для 20% раствора спирта в дистиллированной воде. При этом величина энергозатраты для разных видов разряда уменьшалась в 2–3 раза.

На рис. 7 приведены спектральные характеристики наносекундного разряда в системе «лезвие-лезвие» над поверхностью раствора спирта в дистиллированной воде.

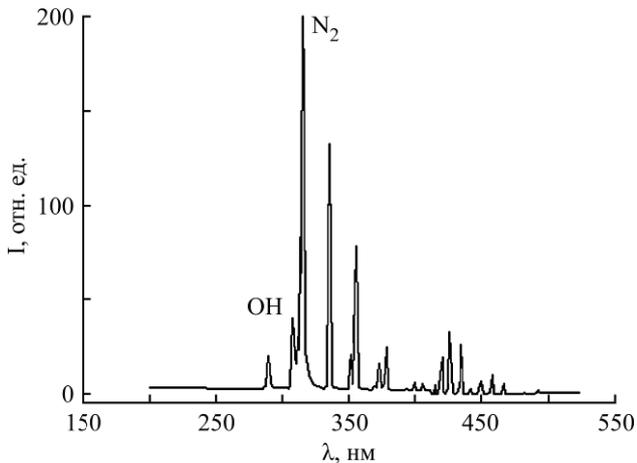


Рис. 7. Спектр излучения плазмы наносекундного разряда над поверхностью раствора этилового спирта (20%) в дистиллированной воде (система электродов «лезвие-лезвие» при $U = 13$ кВ и $f = 80$ Гц).

Спектр излучения поверхностного разряда при небольших частотах следования импульсов тока (40–100 Гц) состоял в основном из полос второй положительной системы молекулы азота в спектральном диапазоне 300–400 нм (рис. 6). Продуктов эрозии материала лезвий и паров воды или спирта не обнаружено.

ВЫВОДЫ

Таким образом, показано, что наносекундный разряд в воздухе атмосферного давления и системой электродов типа «лезвие-поверхность воды (спирта)» без использования предыонизации позволяет получать достаточно однородный разряд и обрабатывать им поверхность неметаллического жидкостного электрода. Установлены условия зажигания устойчивого поверхностного наносекундного разряда над поверхностью воды в системе электродов «лезвие-лезвие» без использования обратного токоввода. Измерение электрических и оптических характеристик этих разрядов показало, что они могут использоваться

в системах поверхностной очистки воды сравнительно большой площади.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш., Гайсин Ф.М. *Струйный многоканальный разряд с электролитическими электродами в процессах обработки твердых тел*. Казань: Изд-во Каз. гос. тех. университета. 2006. 450 с.
2. Баринов Ю.А., Каплан В.Б., Школьник С.М. *Письма в ЖТФ*. 2005, **31**(16), 28–75.
3. Баринов Ю.А., Кузикова И.П., Зиновьева С.В., Школьник С.М. и др. *Письма в ЖТФ*. 2015, **41**(17), 68–75.
4. Молчанова И.В., Цыбульский А.С. *Научные труды МАТИ*. 2010, **89**(17), 414–419.
5. Кузьмичева Л.А., Титова Ю.В., Максимов А.И. *ЭОМ*. 2008, **44**(4), 38–41.
6. Винниченко Д.В. *Технічна електродинаміка*. 2014, (4), 129–131.
7. Кускова Н.И., Бакларь В.Ю., Терехов А.Ю., Ющицина А.Н. и др. *ЭОМ*. 2014, **50**(2), 1–5.
8. Богуславский Л.З. *ЭОМ*. 2014, **46**(4), 73–82.
9. Цымбалюк А.Н., Левко Д.С., Черняк В.Я., Мартыш Е.В. и др. *ЖТФ*. 2013, **83**(8), 53–58.
10. Гайсин А.Ф. *Теплофизика высоких температур*. 2006, **44**(3), 343–348.
11. Белинский В.В., Божко И.В., Чарный Д.В. *Технічна електродинаміка*. 2010, (3), 21–27.
12. Шуайбов А.К., Шевера И.В., Козак Я.Ю., Кентеш Г.В. *Журнал технической физики*. 2014, **84**(6), 143–146.
13. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Успехи физических наук*. 2004, **174**(9), 953–971.
14. Аристовпа Н.А., Пискарев И.М. Вспышечный коронный разряд как источник химически активных частиц. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Тематический том. XI-5. Прикладная химия плазмы*. С. 1–100.
15. Ваулин Д.Н., Ершов А.П., Каменщиков С.А., Черников В.А. *Теплофизика высоких температур*. 2011, **49**(3), 365–372.

Поступила 04.04.16

После доработки 19.05.16

Summary

The article presents the results of the development of a high current nanosecond discharge module above the liquid surface (distilled water and ethyl alcohol solution). The electrical and optical characteristics of the discharge were examined. The conditions for the discharge ignition above fluids on the base of ethyl alcohol and distilled water, and of the discharge between the metal (blade) and the liquid electrode were defined. These discharges are of interest for use in water purification systems (purification of the water surface from the organic films) and the synthesis of nanoparticles (carbon).

Keywords: nanosecond discharge, water, alcohol.