

04

Колебательные процессы в плазме разряда в электролите в магнитном поле

© Д.Л. Кирко

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
115409 Москва, Россия
e-mail: kirko@plasma.mephi.ru

(Поступило в Редакцию 26 июня 2014 г.)

Представлено формирование приэлектродных плазменных областей при разряде в электролите с использованием внешнего магнитного поля. Проведено изучение высокочастотных колебаний в цепи тока разряда в диапазоне частот $\nu = 30 \text{ kHz} - 60 \text{ MHz}$. Выполнены спектральные измерения температуры и концентрации плазмы. В излучении спектральных линий наблюдается присутствие колебательных процессов. Обнаружена стабилизация рабочих режимов разряда под действием магнитного поля в области $B = 100 - 300 \text{ Gs}$. Предлагаются возможные плазменные волны в магнитном поле для объяснения наблюдаемых явлений.

Разряды в электролитах связаны с появлением излучающего разряда, занимающего значительное межэлектродное пространство и сильных конвективных потоков жидкости и пара. Данные разряды находят применение для развития способов полировки сложных металлических поверхностей и экспериментов по возможности упрочнения поверхности металлов [1–6]. Существование разряда сопровождается возникновением колебательных процессов и турбулентных движений плазмы [7]. В некоторых работах подобные негативные явления исключались при использовании магнитного поля в случае газовых разрядов [8]. Ввиду этого в данных экспериментах при разряде в электролите было применено внешнее магнитное поле.

Для создания разряда использовались камеры цилиндрической и конической форм, изготовленные из оргстекла (диаметр $d = 10 - 15 \text{ cm}$, объем $V = 150 - 250 \text{ cm}^3$). На рис. 1 изображена цилиндрическая камера (1), в которую помещался электролит (2), приготовленный с применением карбоната натрия или гидрокарбоната натрия. В качестве катода (3) применялся стержень (материал: вольфрам, титан, диаметр $d = 2 - 3 \text{ mm}$), заключенный в керамическую втулку (4), а в качестве анода (5) — пластина (материал: нержавеющая сталь, молибден, толщина $h = 0.2 - 0.5 \text{ mm}$). Питание разряда осуществлялось с помощью двухполупериодного выпрямителя (6) (напряжение $U = 0 - 250 \text{ V}$, частота 100 Hz). Под камерой были установлены постоянные магниты (7). После включения питания около поверхности катода формируется прикатодная область разряда (8), обладающая максимальной светимостью. Далее располагается средняя плазменная область (9), окруженная парогазовой оболочкой. Изображение разряда в электролите представлено на рис. 2. Для регистрации использовалась камера Panasonic Lumix DMC-FZ45 (временное разрешение 1 ms).

Представим наиболее важные этапы развития разряда в электролите. Для исследований концентрация карбоната натрия (Na_2CO_3) использовалась в диапазоне $C = 0.01 - 1 \text{ M}$ или $m = 1.06 - 106 \text{ g}$ на 10^3 cm^3 дистил-

лированной воды. Рассмотрим вольт-амперную характеристику разряда (ВАХ) при концентрации карбоната натрия 0.1 M (рис. 3). В начале графика зависимость

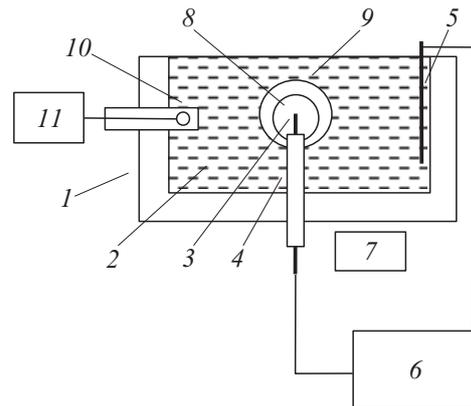


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — корпус, 2 — электролит, 3 — катод, 4 — керамическая трубка, 5 — анод, 6 — источник питания, 7 — постоянные магниты, 8 — прикатодная область разряда, 9 — средняя область, 10 — магнитный зонд, 11 — анализатор спектра.

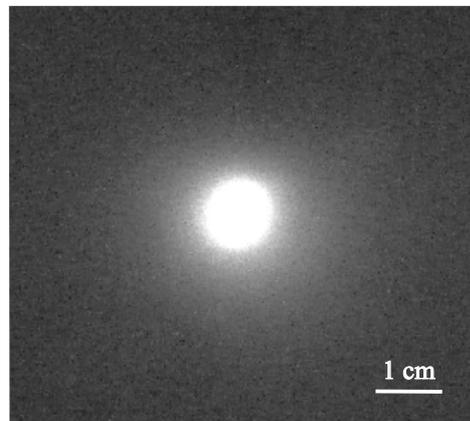


Рис. 2. Фотография разряда в электролите на стадии нормального горения (экспозиция $\Delta t = 1 \text{ ms}$).

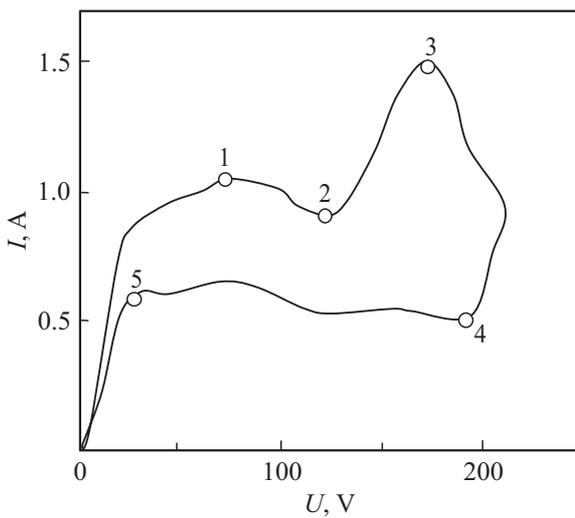


Рис. 3. ВАХ разряда.

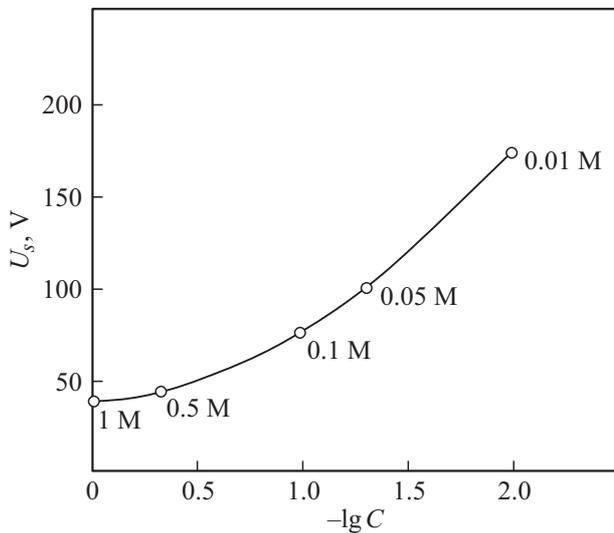


Рис. 4. Зависимость напряжения зажигания от концентрации карбоната натрия.

приблизительно линейная. При увеличении напряжения на поверхности катода наблюдается появление небольших фиолетовых искр с размерами $a = 0.1-0.3$ mm. При значениях напряжения $U = (74 \pm 2)$ V и тока $I = (1.10 \pm 0.05)$ A наблюдается зажигание разряда (точка 1) и возникновение плазмы, окружающей поверхность катода. Зависимость напряжения зажигания от концентрации карбоната натрия представлена на рис. 4. Общей тенденцией является рост напряжения зажигания при уменьшении концентрации. Наиболее типичный цвет свечения разряда желто-красный. Непосредственно у поверхности катода расположена прикатодная область (8) толщиной $h = 1-2$ mm, имеющая высокие излучательные характеристики и наибольшую температуру [7]. Далее следует более разреженная средняя плазменная область (9), которая имеет размеры $l = 1.5-2$ cm, окруженная парогазовой оболочкой. Вви-

ду увеличения сопротивления среды вольт-амперная зависимость далее искривляется (участок 1–2). Затем происходит разгорание разряда и уменьшение сопротивления среды, поэтому ВАХ опять становится линейной до максимума (участок 2–3). Данный участок является основным рабочим диапазоном, на котором наблюдается стабильное нормальное горение разряда. В этом режиме разряда в цепи тока наблюдаются интенсивные колебания. После уменьшения напряжения (участок 3–4) свечение разряда ослабевает и затем разряд погасает (точка 4). На последнем отрезке (участок 5–0) зависимость приблизительно линейная. Было установлено, что на форму ВАХ влияет концентрация карбоната натрия в растворе.

В плазменных областях разряда наблюдаются сильные турбулентные потоки плазмы. Визуализация процессов осуществлялась с помощью камеры (Nikon 1G, временное разрешение 1 ms) в режиме кино съемки. Для регуляризации и упорядоченности движения плазмы разряд был помещен в поле постоянных магнитов (7), размещенных под камерой (см. рис. 1). Магнитная индукция в области разряда варьировала в диапазоне $B = 100-300$ Gs. Под действием магнитного поля в областях разряда стали возникать вращательные движения плазмы в горизонтальной плоскости (по часовой стрелке или против часовой стрелки), связанные с появлением магнитных сил, действующих на токи. На поверхности прикатодной области фиксировались темные точки, а на поверхности средней области темные полосы неправильной формы. Частоты вращения плазмы в прикатодной области составляли $\nu = 5-10$ Hz, а в средней области $\nu = 1-3$ Hz в зависимости от величины магнитного поля и силы тока. Вместе с тем магнитное поле оказывало влияние и на сам характер колебательных процессов в плазменной среде разряда.

Рассмотрим характерные временные зависимости тока разряда. Данные импульсы регистрировались на осциллографе с помощью шунта, расположенного в цепи тока. Повторение импульсов тока происходило с частотой 100 Hz, определяемой источником питания. Форма отдельного импульса тока разряда обычно представляла собой кривую, близкую к затухающей синусоиде с периодом ~ 1.1 ms при количестве периодов $n = 2-3$ (рис. 5, a). Высокочастотные колебания фиксировались в начале каждого первого периода импульса тока, их амплитуда достигала максимальной величины тока разряда. Исследования данных колебаний проводились с помощью магнитных зондов и осциллографа Tektronix TDS 2024B. Результаты измерений обрабатывались посредством программы Origin. Также для изучения использовался анализатор С4-25 (рабочий диапазон 10 kHz–70 MHz). Магнитные зонды были изготовлены в виде небольших катушек (диаметр $d = 2-3$ mm, количество витков $n = 90-170$, диаметр провода 0.1 mm) и были закрыты корпусами от воздействия среды электролита. Зонды (10) помещались в электролит на различном

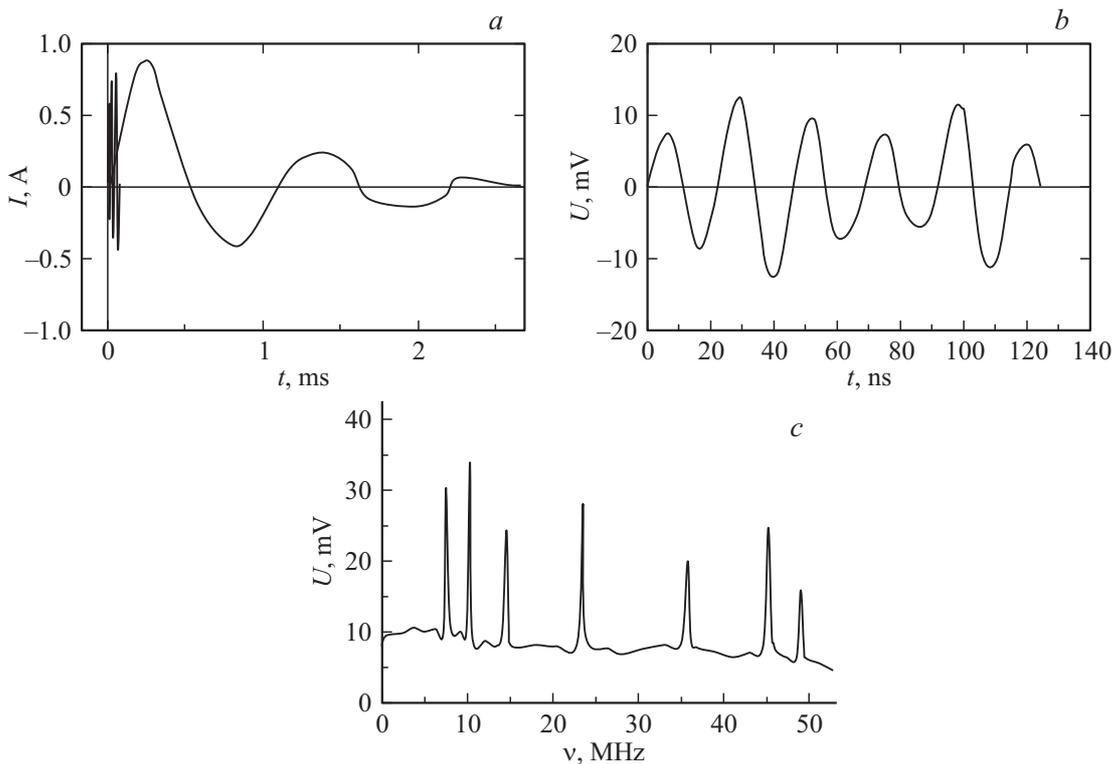


Рис. 5. Колебательные процессы разряда: *a* — осциллограмма отдельного импульса тока разряда, *b* — сигнал магнитного зонда (ток разряда $I = (1.24 \pm 0.05)$ А), *c* — спектр высокочастотных колебаний разряда.

расстоянии от разряда, либо располагались снаружи камеры (см. рис. 1). Сигналы зондовых измерений достаточно хорошо коррелируют с импульсами тока разряда. Характерный сигнал с магнитного зонда, содержащий колебания с периодом ~ 20.2 ns, приведен на рис. 5, *b*. Данные колебания обычно формировали волновые пакеты длительностью $t = 75\text{--}100$ ns с огибающей неправильной формы. С помощью измерений были выявлены наиболее интенсивные частоты собственных колебаний тока разряда. В ходе исследований были обнаружены следующие достаточно интенсивные колебания на следующих частотах: (41 ± 2) kHz, (55 ± 3) kHz, (205 ± 10) kHz, (265 ± 13) kHz, (7.8 ± 0.4) MHz, (10.5 ± 0.5) MHz, (14.6 ± 0.7) MHz, (23 ± 1) MHz, (36 ± 2) MHz, (45 ± 2) MHz, (49 ± 3) MHz. Спектр высокочастотных колебаний разряда представлен на рис. 5, *c*. Было проведено сопоставление частот, полученных в данных экспериментах с ранее проведенными опытами в отсутствие магнитного поля [7]. Фиксируется смещение регистрируемых частот при наличии внешнего магнитного поля в области разряда.

Ввиду наличия внешнего магнитного поля условия для существования плазмы в объеме разряда были изменены. Магнитное поле приводит к возникновению различных плазменных волн. Ввиду конфигурации магнитного поля в межэлектродном пространстве наиболее вероятным является случай движения волн вдоль магнитного поля. Ионно-циклотронные и

электронно-циклотронные волны описываются с помощью следующего дисперсионного уравнения [9]: $k^2 = \omega^2/c^2 [1 - (\omega_{pe}^2 + \omega_{pi}^2)/((\omega - \omega_{Be})(\omega + \omega_{Bi}))]$. Рассмотрим основные плазменные частоты при значении магнитного поля $B = 200$ Gs. Ионно-циклотронная и электронно-циклотронная частоты составляют соответственно: $\omega_{Bi} = eB/m_p = 1.92 \cdot 10^6$ s $^{-1}$ и $\omega_{Be} = eB/m_e = 3.52 \cdot 10^9$ s $^{-1}$. Плазменная частота при характерном значении электронной концентрации $n_e = 4.2 \cdot 10^{15}$ cm $^{-3}$ [7] равна $\omega_{pe} = (4\pi n_e e^2/m_e)^{1/2} = 3.6 \cdot 10^{12}$ s $^{-1}$. В результате все зарегистрированные частоты могут соответствовать ионно-циклотронным и электронно-циклотронным плазменным волнам.

Представим расчеты для двух частот из наблюдаемого диапазона. Частота $\nu = 205$ kHz будет соответствовать ионно-циклотронной волне с длиной волны $\lambda \approx 4.5$ cm и скоростью $v \approx 9.2 \cdot 10^5$ cm/s. Другая частота $\nu = 36$ MHz связана с электронно-циклотронной волной с длиной волны $\lambda \approx 2.1$ mm и скоростью $v \approx 7.6 \cdot 10^6$ cm/s. Данные длины волн по порядку близки к размеру межэлектродного пространства между катодом и анодом $l = 4\text{--}5$ cm, и могут быть сопоставлены с диаметром катода $d = 2\text{--}3$ mm. Для параметра экранирования плазмы — радиуса Дебая при характерных значениях температуры $T = 2100$ K и концентрации $n_e = 4.2 \cdot 10^{15}$ cm $^{-3}$ [7] можно получить следующее значение: $r_d = (kT/4\pi n_e e^2)^{1/2} = 4.8 \cdot 10^{-6}$ cm. Данная величина дебаевского радиуса существенно меньше размеров типичных неоднородностей в разряде.

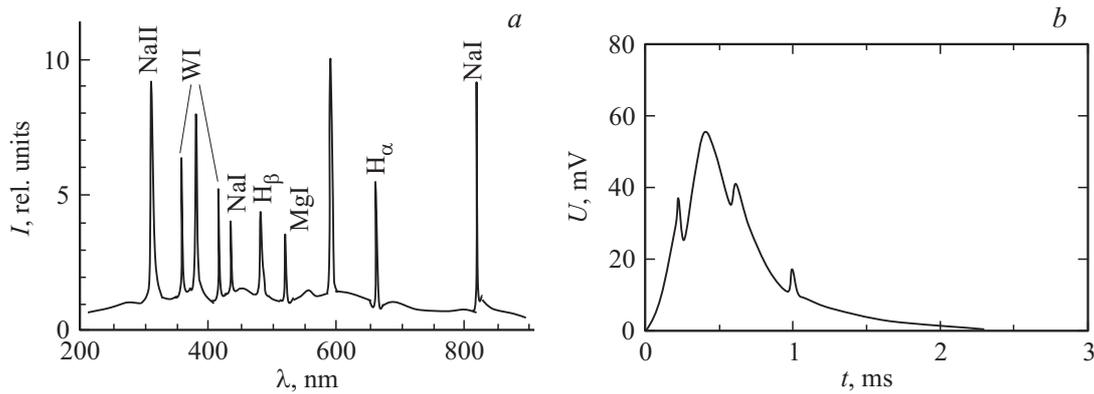


Рис. 6. Излучение разряда в электролите: *a* — спектр излучения разряда в электролите, *b* — осциллограмма излучения линии H_{α} 656 nm.

Спектральные исследования излучения разряда проводились с помощью спектрометра Ava Spec 2048 (рабочий диапазон $\lambda = 200\text{--}1000$ nm, спектральное разрешение 0.3 nm), монохроматора МУМ (рабочий диапазон $\lambda = 200\text{--}800$ nm, спектральное разрешение 0.2 nm) и фотозлектронного умножителя ФЭУ-85 (временное разрешение $\Delta t = 5$ ns). Излучение регистрировалось с помощью оптической схемы, состоящей из ахроматического конденсора, который проектировал изображение разряда на входной световод спектрометра или входную щель монохроматора. Наряду с установкой, изображенной на рис. 1, применялась также цилиндрическая камера с окнами из кварцевого стекла. Был исследован коэффициент пропускания раствора для диапазона $\lambda = 200\text{--}1000$ nm.

При фоторегистрации разряда наибольшей интенсивностью излучения обладает прикатодная область разряда (толщина $d = 1\text{--}2$ mm), меньшая интенсивность излучения наблюдается у средней области (размеры $l = 1.5\text{--}2$ cm). На рис. 6, *a* представлен спектр интегрального излучения разряда при величине тока $I = (1.25 \pm 0.05)$ A (участок 2–3 на рис. 3). Наибольшей интенсивностью обладают линии атомов натрия NaI 589, 819 nm, и иона натрия NaII 309, а также атомов вольфрама WI 384 nm. Меньшая интенсивность излучения наблюдается для следующих линий: атомов вольфрама WI 360, 420 nm, атомов водорода H_{α} 656 nm, H_{β} 486 nm, атомов натрия NaI 439 nm, атомов магния MgI 518 nm. На рис. 6, *b* представлена типичная временная зависимость интенсивности линии H_{α} 656 nm, которая достаточно хорошо коррелирует с временной зависимостью тока. На временных зависимостях интенсивностей линий атомарного водорода и вольфрама были обнаружены колебательные режимы с частотами $\nu = (5.9 \pm 0.3)$ kHz и $\nu = (5.3 \pm 0.3)$ kHz.

По линиям атомарного водорода H_{α} и H_{β} методом относительных интенсивностей [10] была рассчитана температура плазмы в прикатодной области плазмы, которая составила $T = 2800 \pm 200$ K в рабочем режиме разряда при величине тока $I = (1.22 \pm 0.05)$ A (участок 2–3 на рис. 3). С помощью штарковского уширения

водородных линий H_{α} и H_{β} была получена концентрация плазмы $n_e = (3.4 \pm 0.2) \cdot 10^{15}$ cm $^{-3}$ в режиме разряда при значении тока $I = (1.24 \pm 0.05)$ A (участок 2–3 на рис. 3).

В настоящей работе были исследованы режимы разряда в электролите при наличии в области разряда внешнего магнитного поля. Проведено изучение колебательных процессов разряда, и определен ряд основных частот колебаний в диапазоне $\nu = 30$ kHz–60 MHz. Согласно спектральным измерениям, температура плазмы в прикатодной области принимает значение $T = (2300 \pm 200)$ K. В излучении спектральных линий также существуют колебательные процессы. Происходит стабилизация движения плазмы в приэлектродных областях под действием магнитного поля. Согласно проведенным расчетам, в данном разряде возможно существование ионно-циклотронных и электронно-циклотронных плазменных волн.

Список литературы

- [1] Гайсин Ал.Ф., Насибуллин Р.Т. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. Вып. 10. С. 959–966.
- [2] Kayumov R.R., Gaysin A.F., Son E.E., Gaysin Az.F., Gaysin F.M. // Phys. Scripta. 2010. Vol. T142. P. 014 038–014 041.
- [3] Krastev D., Paunov V., Yordanov B., Lazarova V. // J. Chem. Technol. Metallurg. 2014. Vol. 49. N 1. P. 35–39.
- [4] Du C., Cui J., Wu L., He G. // Mater. Manufactur. Processes. 2010. Vol. 25. P. 644–647.
- [5] Суминов И.В., Эпельфельд А.В. // Приборы. 2001. Т. 9. С. 13–23.
- [6] Канарев Ф.М. Низкоамперный электролиз воды. Краснодар: Изд-во Краснодарского ун-та, 2010. 81 с.
- [7] Кирко Д.Л., Савелов А.С., Визгалов И.В. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. Вып. 11. С. 3–6.
- [8] Кирдяшев К.Л., Кубарев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 5. С. 1–10.
- [9] Кролл Н., Трайвелтис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975. 525 с.
- [10] Хаддлстоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967. 515 с.