

04

Установка для исследования взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью растворов

© А.В. Чистилинов¹, Р.В. Якушин², В.М. Чепелев¹, А.С. Тюфтяев¹, М.Х. Гаджиев¹¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия² Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

E-mail: a-chi@yandex.ru

Поступило в Редакцию 12 июля 2024 г.

В окончательной редакции 14 октября 2024 г.

Принято к публикации 14 октября 2024 г.

Представлена установка для исследования взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью водных растворов. В установке реализована оригинальная система поддержания регулируемого уровня жидкости в проточной разрядной ячейке. Для оптических исследований разряда наиболее интересен особый случай, когда уровень раствора совпадает с краем разрядной ячейки. Показано, что в этом случае удается получить фотографии области взаимодействия плазмы с поверхностью жидкости, не искаженные наложением отраженного от этой поверхности излучения плазмы. Установка может быть использована для широкого спектра исследований взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью жидкостей, в том числе с применением оптических методов и методов эмиссионной спектроскопии.

Ключевые слова: уровень жидкости, жидкий электрод, плазма, поверхность, электрический разряд, скоростная фотосъемка, эмиссионная спектроскопия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59834.20058

В последние два десятилетия наблюдается значительный интерес к исследованию взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью жидкости, в частности с поверхностью водных растворов. Этот интерес связан прежде всего с перспективами практического применения такого взаимодействия. Можно выделить такие направления практического использования взаимодействия плазмы с поверхностью жидкости, как очистка воды от органических соединений, спектрально-эмиссионный анализ ионов металлов в водных растворах, синтез и полимеризация органических соединений в растворах, стерилизация водных растворов под действием активных частиц и УФ-излучения электроразрядной плазмы, синтез наночастиц под действием разрядов в жидкости, модификация поверхности полимерных материалов в водных растворах и т.д. [1–3].

Перспективы возможных приложений стимулируют исследование различных аспектов взаимодействия плазмы с водными растворами [4–9]. Поскольку водные растворы являются электропроводящими, наиболее эффективным способом организации взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью раствора является создание электрического разряда, в котором этот раствор выполняет роль одного из электродов. С точки зрения исследования наиболее удобной является система pin-to-plate, т.е. система, в которой электрический разряд создается между стержневым металлическим электродом и плоской поверхностью жидкости [10]. В этом случае любые зоны разряда являются легкодоступными для оптических исследований.

Особенностью исследований взаимодействия плазмы с водными растворами является необходимость поддержания постоянства состава и температуры водного раствора в процессе эксперимента. Для этого в экспериментах обычно используют проточные емкости, в которых раствор постоянно обновляется. При этом установка должна быть организована так, чтобы уровень раствора в области взаимодействия с плазмой не менялся. Обычная система поддержания уровня раствора, представляющая стандарт исследований в настоящее время, основана на свободном переливании подаваемой в сосуд жидкости через его край [10].

Однако такой способ организации установки имеет несколько очевидных недостатков. Во-первых, такая система неудобна, поскольку требует наличия специального сосуда для сбора переливающейся через край жидкости. Во-вторых, переливание жидкости через край неустойчиво и сильно зависит от незначительного изменения наклона сосуда. В-третьих, уровень раствора оказывается привязан к уровню края сосуда и его никак нельзя регулировать.

Не столь очевидная, но более важная проблема состоит в том, что поверхность раствора при такой организации установки не является всюду плоской. Вблизи края сосуда она оказывается сильно искривлена, а поскольку поверхность раствора при малых углах падения излучения имеет высокий коэффициент отражения, это приводит к формированию довольно яркого отраженного изображения разряда при съемке вдоль поверхности раствора [4,10]. В результате любые оптические измерения зоны разряда вблизи поверхности раствора, будь то ско-

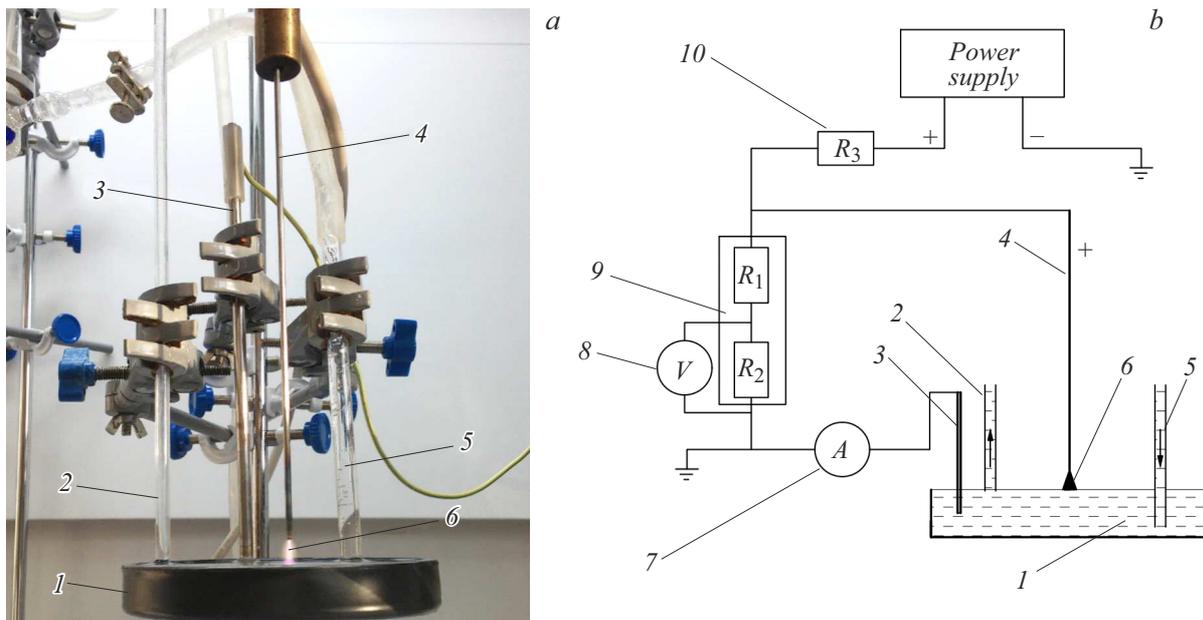


Рис. 1. Экспериментальная установка. *a* — фотография разрядной части, *b* — схема разрядной части. 1 — проточная разрядная ячейка, 2 — трубка для подачи раствора в разрядную ячейку, 3 — катод, 4 — анод, 5 — трубка для откачивания раствора из разрядной ячейки, 6 — разряд, 7 — амперметр, 8 — вольтметр, 9 — делитель напряжения, 10 — балластное сопротивление.

ростная визуализация или спектральные исследования, оказываются искаженными из-за наложения на эту зону отраженного изображения.

Для того чтобы преодолеть эти проблемы, нами была разработана и опробована в эксперименте установка, основанная на совершенно другом принципе поддержания уровня раствора. В созданной нами установке раствор подавался в проточную емкость со свободной поверхностью по одной трубке, а по другой трубке происходило его откачивание из этой емкости насосом, способным перекачивать как жидкость, так и газ. При этом скорость откачивания, обеспечиваемая насосом, была выше, чем скорость подачи раствора. В результате уровень раствора в проточной емкости поддерживался в точности на уровне среза трубки откачивания раствора. Изменение положения среза трубки откачивания раствора позволяло регулировать положение уровня раствора в емкости с высокой точностью (рис. 1).

Подача раствора в емкость в нашей установке осуществлялась перистальтическим насосом Lead Fluid BT601S, который позволял регулировать скорость подачи в широких пределах. Для того чтобы убрать пульсации скорости потока, на выходе из перистальтического насоса последовательно ставились два стандартных гасителя пульсаций потока. Откачка раствора осуществлялась мембранным насосом KNF Flodos NF 30 KPE с нерегулируемой скоростью. Максимальная скорость откачки раствора, которую обеспечивал насос, составляла 420 ml/min. Было показано, что установка может поддерживать стабильный уровень раствора при скоростях его подачи от 50 до 350 ml/min. При этом ни

подача раствора, ни его откачка не создают заметных возмущений на поверхности жидкости. Было показано, что при заданной скорости подачи раствора его уровень в проточной емкости можно регулировать с высокой точностью вертикальным перемещением среза трубки откачки раствора. При проведении съемок разряда, одним из электродов которого являлся раствор (разряд постоянного тока с жидким катодом), поверхность раствора в разрядной ячейке выставлялась на уровне края разрядной ячейки так, чтобы поверхность жидкости оставалась всюду плоской (рис. 1, *a*).

В качестве разрядной ячейки использовалась стеклянная цилиндрическая емкость высотой 14 mm и объемом 100 ml. Скорость прокачки раствора составляла 330 ml/min, полное обновление раствора в разрядной ячейке происходило за 18 s.

Стержневой электрод из вольфрама диаметром 2 mm находился над поверхностью раствора. Его положение регулировалось микрометрическим винтом. На этот электрод через балластное сопротивление подавалось постоянное положительное напряжение от стабилизированного источника питания. Второй (заземленный) электрод из нержавеющей стали был погружен в раствор (рис. 1, *b*).

Скоростная цветная фотосъемка разряда проводилась при разрядном токе 20 mA и расстоянии между электродом и поверхностью раствора 4 mm. Съемка осуществлялась вдоль поверхности раствора фотоаппаратом Nikon D500. Время экспозиции одного кадра составляло 125 μ s. Расстояние от катодного пятна на поверхности раствора до стенки разрядной ячейки составляло около

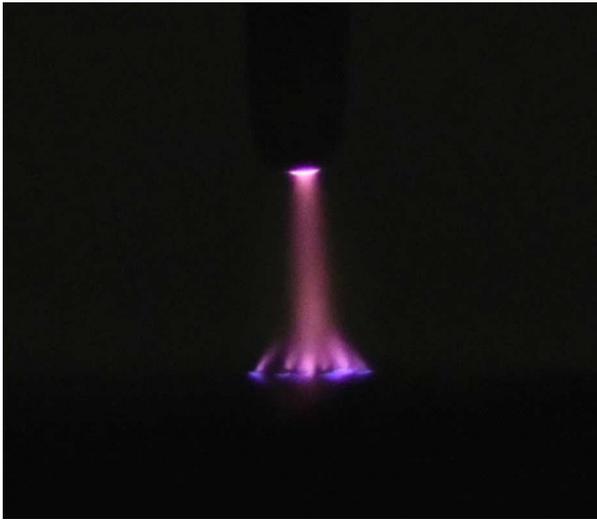


Рис. 2. Фотография разряда с жидким катодом. Разрядный ток 20 mA, разрядный промежуток 4 mm, раствор NaOH с электропроводностью 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Экспозиция 125 μs .

10 mm. Стенка разрядной ячейки была затемнена, чтобы избежать засветки от переотражений излучения разряда внутри разрядной ячейки (рис. 1, *a*). Для проведения эксперимента использовался раствор NaOH в деионизированной воде с удельной электропроводностью 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Температура раствора на входе в разрядную ячейку составляла $14 \pm 2^\circ\text{C}$. Результат скоростной фотосъемки разрядного канала представлен на рис. 2.

Как показали данные скоростной фотосъемки, благодаря используемому методу удалось получить полную фотографию разряда, включая зону вблизи поверхности раствора, при практически полном отсутствии отраженного от поверхности раствора изображения (рис. 2). Фотографии, полученные благодаря данному методу, позволяют изучать взаимодействие плазмы с поверхностью раствора (в частности, в разряде с жидким катодом особенности филаментации разрядного канала вблизи поверхности раствора, а также катодные пятна непосредственно на его поверхности).

Поскольку, как показывает скоростная фотосъемка разряда, отражение от поверхности раствора при данном методе съемки фактически отсутствует, описанная установка позволяет проводить исследования эмиссионных свойств электроразрядной плазмы вблизи поверхности раствора без искажений, связанных с отражением от поверхности раствора.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № 075-00269-25-00).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Yang, Y.I. Cho, A. Fridman, *Plasma discharge in liquid: water treatment and applications* (CRC Press, 2012). DOI: 10.1201/b11650
- [2] J. Ren, M. Yao, W. Yang, Y. Li, J. Gao, *Centr. Eur. J. Chem.*, **12** (12), 1213 (2014). DOI: 10.2478/s11532-014-0575-6
- [3] F. Rezaei, P. Vanraes, A. Nikiforov, R. Morent, N. De Geyter, *Materials*, **12** (17), 2751 (2019). DOI: 10.3390/ma12172751
- [4] P. Bruggeman, C. Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42** (5), 053001 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/5/053001
- [5] P. Vanraes, A. Bogaerts, *Appl. Phys. Rev.*, **5** (3), 031103 (2018). DOI: 10.1063/1.5020511
- [6] A.V. Chistolinov, R.V. Yakushin, A.V. Perfilieva, M.A. Sargsyan, M.Kh. Gadzhiev, A.S. Tyuftyaev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1698**, 012020 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1698/1/012020
- [7] P. Bruggeman, R. Frontiera, U. Kortshagen, M. Kushner, S. Linic, G. Schatz, H. Andaraarachchi, S. Exarhos, L. Jones, C. Mueller, C. Rich, C. Xu, Y. Yue, Y. Zhang, *J. Appl. Phys.*, **129**, 200902 (2021). DOI: 10.1063/5.0044261
- [8] A.V. Chistolinov, M.A. Khromov, R.V. Yakushin, M.Kh. Gadzhiev, A.S. Tyuftyaev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2100**, 012025 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1394/1/012006
- [9] А.В. Чистолинов, Р.В. Якушин, А.В. Перфильева, *Прикладная физика*, № 1, 12 (2022). DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-12-18
- [10] P. Bruggeman, J. Liu, J. Degroote, M.G. Kong, J. Vierendeels, C. Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41** (21), 215201 (2008). DOI: 10.1088/0022-3727/41/21/215201