

Определение характеристик плазмы импульсного разряда, распространяющегося над поверхностью воды, спектральными методами

А. Ф. Александров, Д. Н. Ваулин^a, Жэнь Ци^b, В. А. Черников

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

E-mail: ^avaulind@yandex.ru, ^bmsuphysrenqi@gmail.com

Статья поступила 04.01.2012, подписана в печать 02.03.2012.

Приводятся результаты спектральных исследований концентрации электронов и температуры возбуждения в плазме импульсного разряда, распространяющегося над поверхностью жидкости.

Ключевые слова: импульсный разряд, поверхность жидкости, концентрация электронов, температура возбуждения.

УДК: 533.9: 551.594. PACS: 52.25.Os.

Введение

В последнее время наблюдается интерес к исследованию импульсных электрических разрядов, распространяющихся в атмосфере над поверхностью слабопроводящей жидкости. Подобные разряды могут быть эффективны для различных технологических применений, таких как электроразрядная очистка воды [1, 2], инициирование реакций в жидкости с использованием активных частиц, образующихся в газовой фазе [3], для обработки материала твердого электрода [4], а также для разработки средств молниезащиты [5].

В настоящей статье приводятся результаты экспериментального определения спектральными методами концентрации электронов и температуры возбуждения в плазме импульсного высоковольтного разряда распространяющегося над поверхностью воды.

1. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки, использованной при проведении настоящих исследований, приведена на рис. 1. Техническая вода 1 наливалась в диэлектрическую кювету 2, над которой располагался высоковольтный отрицательный электрод (катод) 3. Плоский заземленный электрод (анод) 4 размещался непосредственно в жидкости у противоположной стенки кюветы. В экспериментах использовался катод в форме заостренной иглы, сделанной либо из меди. Анод был выполнен из латуни. В качестве источника питания применялся импульсный модулятор 5, вырабатывающий квазипрямоугольный импульс с амплитудой

напряжения, изменяемой от 5 до 28 кВ, и переменной длительностью от 5 до 1000 мкс. Ограничение разрядного тока осуществлялось балластным сопротивлением (R_b), включенным последовательно с разрядом 6. Падение напряжения на разряде определялось при помощи омического делителя напряжения (7) (R_1, R_2 со значениями 2 МОм, 1 кОм соответственно), а разрядный ток измерялся при помощи шунта ($R_{sh} = 0.5$ Ом). Сигналы с делителя напряжения и шунта подавались (8) на два входа цифрового запоминающего осциллографа «Tektronics TDS-2004B» с максимальной частотой пропускания 60 МГц. Излучение разряда, при помощи промежуточной линзы 9 фокусировалось на вход световода 10, соединенного с регистрирующим спектрографом типа AvaSpec 11, данные с которого передавались на персональный компьютер 12. Входная часть световода размещалась на юстировочной системе 13, позволяющей при ее перемещении 14 параллельно оси разряда регистрировать излучение из различных его участков.

2. Экспериментальные результаты

Прежде всего были проведены предварительные эксперименты по исследованию интегральной (по спектру в полосе пропускания воздуха) интенсивности свечения импульсного разряда над поверхностью воды. Для регистрации свечения использовался фотоумножитель, который располагался на расстоянии 10 см от разряда, что позволяло регистрировать свечение как из достаточно протяженной области разряда (при отсутствии коллимирующей щели на входе фотоумножителя), так и из сравнительно узких его участков (с коллимирующей щелью). Разрядный ток, падение напряжения на разряде и сигналы с фотоумножителя регистрировались на многоканальном запоминающем осциллографе.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы свечения разряда для случая неколлимированного и коллимированного фотоумножителя. В первом случае свечение регистрировалось из области катода размером ~ 3 см, а во втором — из области непосредственно у анода с линейными размерами ~ 5 мм.

Как следует из приведенных осциллограмм, в случае расположения фотоумножителя у катода интенсивность

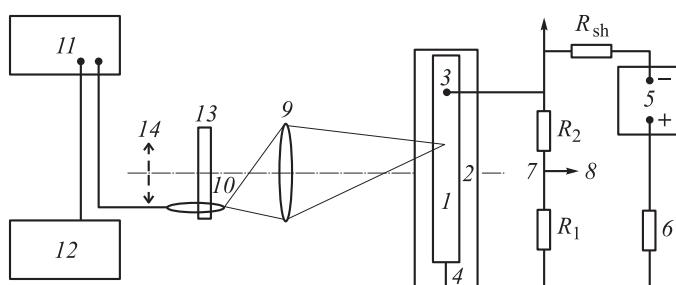


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (вид сверху)

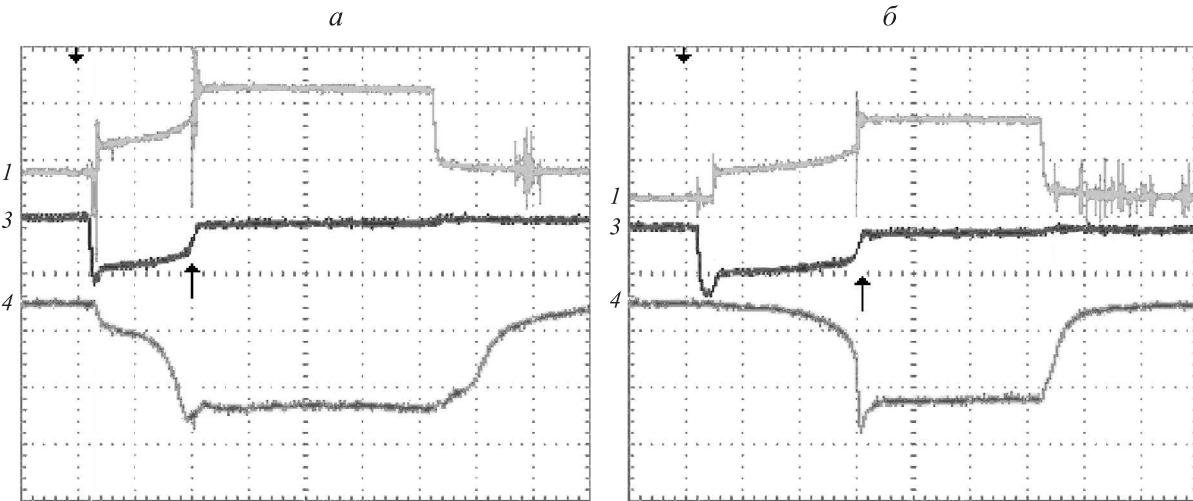


Рис. 2. Осциллографммы тока (1), падения напряжения (3) и свечения разряда (4), $U_0 = 14$ кВ, $R_b = 2$ кОм. Стрелками обозначены начало импульса и замыкание разряда на анод. Фотоумножитель *а* — неколлимированный у катода, *б* — коллимированный у анода. Чувствительность по току 2 В/дел, по напряжению 5 В/дел, по свечению 500 мВ/дел. Временная развертка 500 мкс/дел. Длительность разряда 300 мкс

свечения разряда нарастает за время распространения разряда от катода к аноду, при этом наблюдается пиковое значение интенсивности в момент замыкания разряда на анод. В случае же расположения фотоумножителя у анода интенсивность свечения за время распространения разряда остается практически на нулевом уровне и только в момент достижения разрядом анода (т. е. места, из которого регистрируется излучение) наблюдается, как и в предыдущем случае, пик интенсивности свечения. Из приведенных осциллографмм, кроме того, видно, что моменты резкого возрастания тока, уменьшения падения напряжения на разряде и пика интенсивности свечения полностью совпадают и соответствует моменту замыкания разряда на анод.

Вследствие того что интенсивность излучения разряда при его распространении над поверхностью воды оказалась относительно слабой для регистрации спектров с временным разрешением, в настоящей работе использовался режим накопления. В этом случае высоковольтный генератор работал в непрерывном режиме с частотой следования импульсов $\nu = 10$ Гц, при длительности импульса, изменяемой в диапазоне 100–800 мкс, за такое время разряд стабильно достигал своей завершенной стадии. Время регистрации спектра выбиралось в зависимости от начальных условий и варьировалось в диапазоне 100 мс — 120 с. Таким образом, экспериментально регистрировался интегральный по времени спектр излучения разряда. Так как основное излучение разряда соответствует его завершенной стадии, то в этом случае все полученные результаты относятся именно к этой стадии.

На рис. 3 показан типичный спектр излучения разряда в катодной области. Из приведенного спектра следует, что он состоит, в основном из спектральных линий меди, линий H_α и H_β водорода и молекулярных полос CN. При удалении от катода спектр излучения становится более простым, в нем содержатся только спектральные линии водорода и полосы CN, и только в области анода в спектре появляются относительно слабые линии меди.

По относительным интенсивностям некоторых пар спектральных линий меди определялась температура возбуждения верхней уровней выбранных линий, при этом такие измерения были возможны только в приэлектродных областях, в которых, как указывалось ранее, возможна регистрация в излучении разряда необходимых линий меди. На рис. 4 приведена зависимость от разрядного тока температуры возбуждения, определенной по следующим парам спектральных линий меди: 515.3–578.2 и 521.8–578.2 нм. Видно, что значения температуры возбуждения, определенные по этим парам линий, практически совпадают в пределах ошибки измерений (20%), что вполне закономерно, так как спектральные линии 515.3 и 521.8 нм имеют один и тот же верхний энергетический уровень, для которого температура возбуждения должна быть одинаковой. При этом температура возбуждения не зависит от тока разряда и остается практически постоянной и равной по величине 10500 ± 500 К.

По уширению спектральных линий водорода определялась концентрация электронов в плазме завершенного импульсного разряда над поверхностью воды, причем такие измерения можно было проводить для любых точек, расположенных между катодом и анодом. Концентрация электронов определялась по штарковским профилям спектральных линий водорода. Ранее указывалось, что в спектрах излучения разряда, полученных в любых точках междуэлектродного пространства, всегда присутствуют водородные линии H_α и H_β . Однако экспериментально измеренные уширения в результате линейного эффекта Штарка спектральной линии H_α водорода оказались сравнимыми с полушириной аппаратной функции спектральной системы, что могло привести к значительным экспериментальным ошибкам. Поэтому в условиях данных экспериментов концентрация электронов определялась по уширению спектральной линии H_β водорода. Аппаратная функция спектрометра определялась экспериментально. Для этого использовалось излучение He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 632.8$ нм, полуширина линии которого, согласно

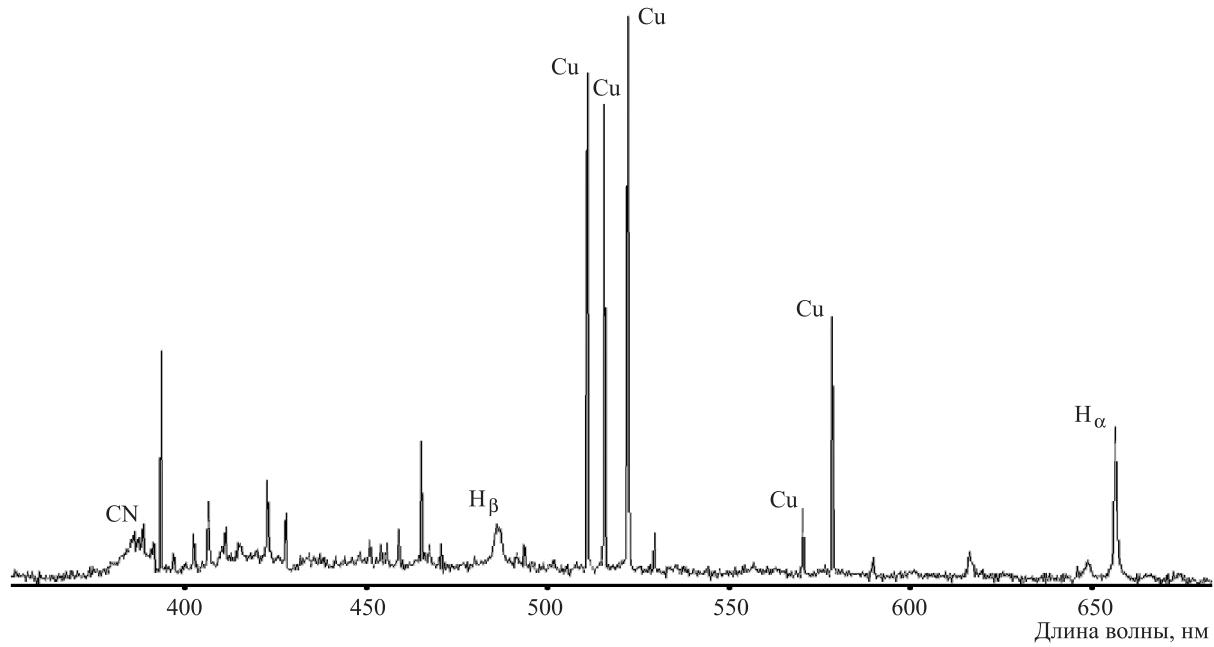
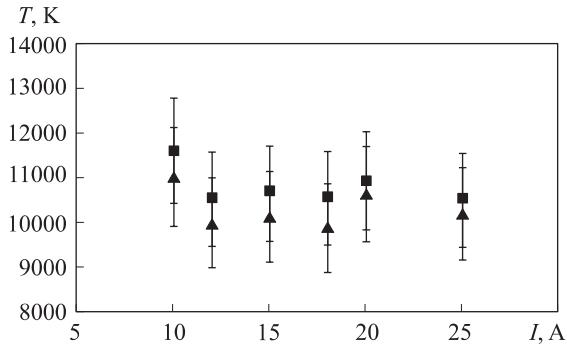


Рис. 3. Спектр разряда в области катода

Рис. 4. Зависимость температуры возбуждения от тока разряда для пар линий: квадраты — 515.3–578.2 нм, треугольники — 521.8–578.2 нм. $L = 5$ см, $\tau = 150$ мкс

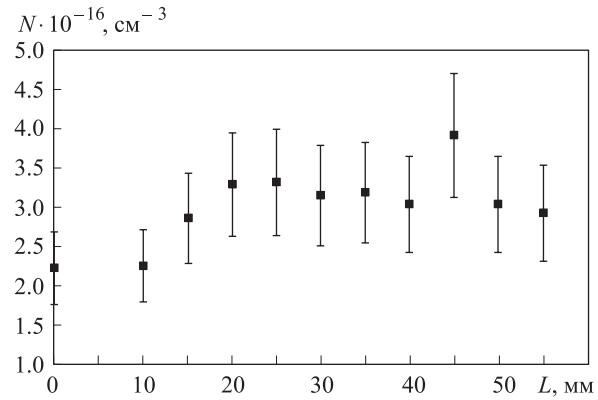
паспортным данным, была $\Delta\lambda = 0.03$ нм. Значение аппаратной функции оказалось равным $\Delta\lambda_{ap} \sim 0.37$ нм. Предварительные эксперименты показали, что профили как аппаратной функции, так и линии H_β наиболее соответствует лоренцевскому распределению. Поэтому истинное уширение спектральной линии H_β на уровне половины максимального значения, определялось по формуле $\Delta\lambda_s = \Delta\lambda_{ex} - \Delta\lambda_{ap}$, где $\Delta\lambda_s$ — истинное уширение спектральной линии в результате линейного эффекта Штарка, $\Delta\lambda_{ex}$ — экспериментально определенная полуширина линии H_β , а $\Delta\lambda_{ap}$ — полуширина аппаратной функции.

Концентрация электронов определялась по известному истинному уширению линии H_β согласно следующей формуле [6, 7]:

$$n_e = 10^{13} \cdot (\Delta\lambda)^{3/2} [C_0(T) + C_1(T) \ln(\Delta\lambda)],$$

для которой значения констант C_0 и C_1 брались из табличных данных, приведенных в [7].

На рис. 5 приведено распределение концентрации электронов вдоль разряда от катода ($X = 0$) до анода. Видно, что концентрация электронов вдоль канала

Рис. 5. Распределение концентрации электронов по длине разряда. $U_0 = 19$ кВ, $\tau = 150$ мкс

разряда практически не изменяется и остается постоянной примерно равной $3 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Отметим, что полученные значения плотности электронов являются усредненными по сечению разрядного канала.

На рис. 6 приведена зависимость концентрации электронов от величины разрядного тока для условий, при которых спектр излучения регистрировался из области, расположенной около катода. Видно, что концентрация электронов растет с увеличением тока разряда, достигая максимального значения порядка $3 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ при токе ~ 20 А. Следует отметить, что согласно результатам, представленным на рис. 5, концентрация электронов в области катода минимальна. Поэтому плотность электронов в областях, близких к аноду, при одинаковой величине тока разряда может превышать значения, приведенные на рис. 6.

Отметим, что в случае незавершенного разряда, когда заключительная стадия с постоянным по величине током разряда не реализуется, спектральные измерения могут сопровождаться большим разбросом экспериментальных данных. Это связано с тем, что в течение

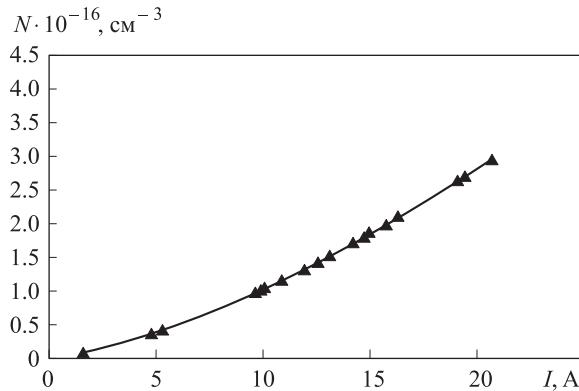


Рис. 6. Зависимость концентрации электронов в области катода от тока разряда. $L = 6$ см, $\tau = 100$ мкс

большого времени накопления (1–2 с), необходимого для регистрации спектра, полная длина разрядного канала может изменяться в достаточно широких пределах, оставаясь меньше межэлектродного расстояния (разряд незавершенный). Это приводит к тому, что в таких же пределах будут изменяться и значения разрядного тока, а следовательно, и плотности электронов. Тем не менее на основании результатов, полученных для незавершенного разряда, можно выявить определенные характерные закономерности. Так, наблюдается тенденция к слабому росту температуры возбуждения с увеличением разрядного тока, но по абсолютной величине средняя температура возбуждения в незавершенном разряде равна 7000–7500 К, что меньше аналогичного значения для случая завершенного разряда. Концентрация электронов в случае незавершенного разряда оказывается практически на порядок меньше, чем для завершенного разряда. Отметим, что подобные результаты для двух форм разряда над поверхностью воды были получены в работе [8].

Представляет определенный интерес провести сравнение результатов, полученных в настоящей работе, с оценками, выполненными на основании формулы Саха для однократно ионизованного газа. С помощью этой формулы, используя полученные экспериментально значения концентрации электронов, получаем соответствующую величину температуры $T \sim 8000$ К, которая меньше экспериментально определенного значения температуры возбуждения. Отметим, что температура возбуждения, определенная в настоящей работе является нижним пределом значений электронов, которая может значительно превышать измеренную величину. Температура нейтрального газа в настоящей работе не

измерялась, однако, в работе [8] показано, что при токах до 150 А значительно превышающих значения токов в настоящей работе, измеренная температура газа достигает значения ~ 5000 К, которое меньше измеренной в настоящей работе температуры возбуждения и тем более меньше температуры электронов. Таким образом, на основании сравнения приведенных значений температуры возбуждения (экспериментальной и расчетной) и газовой температуры, можно сделать заключение о том, что в условиях настоящей работы плазма импульсного разряда, распространяющаяся над поверхностью воды, является неизотермической.

Заключение

Установлено что моменты резкого возрастания тока, уменьшения падения напряжения на разряде, распространяющемся над поверхностью жидкости, и пика интенсивности свечения полностью совпадают и соответствуют моменту замыкания разряда на анод. Получены спектры излучения разряда. С их помощью определены температура возбуждения некоторых линий и концентрация электронов в плазме. Получены зависимости этих величин от разрядного тока и расстояния от катода. Проведено сравнение температуры возбуждения полученной экспериментально с рассчитанной по формуле Саха. На основании полученных результатов сделан вывод о неизотермичности плазмы разряда, распространяющегося над поверхностью жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Список литературы

- Белошеев В.П. Устройство для обеззараживания питьевой и сточной воды. Патент РФ № 2042641 от 14.05.92.
- Шмелев В.М., Евтиюхов Н.В., Козлов Ю.Н., Бархударов Э.М. // Хим. физика. 2004. **23**, № 9. С. 77.
- Пискарев И.М., Рылова А.Е., Севастьянов А.И. // Электрохимия. 1966. **32**, № 7. С. 895.
- Гайсин А.Ф., Сон Э.Е. // ТВТ. 2005. 2005. **43**, № 1. С. 5.
- Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. // Журн. техн. физ. 2007. **77**, № 8. С. 44.
- Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М., 1978.
- Касабов Г.А., Елисеев В.В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. М., 1973.
- Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Kor'ev V.A., Kossyi I.A. // 28th ICPIG. July 15–20, 2007. Prague, Czech Republic.

Pulse discharge, propagating above water surface, plasma characteristics determination by spectroscopic methods**A. F. Aleksandrov, D. N. Vaulin^a, Ren Qi^b, V. A. Chernikov***Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^avaulind@yandex.ru, ^bmsuphysrenqi@gmail.com.*

Results of spectroscopic research of electron density and excitation temperature of pulsed discharge, propagating above liquid surface, plasma are presented.

Keywords: pulsed discharge, liquid surface, electron density, excitation temperature.

PACS: 52.25.Os.

Received 4 January 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2012).

Сведения об авторах

1. Александров Андрей Федорович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-25-74.
2. Ваулин Дмитрий Николаевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: vaulind@yandex.ru.
3. Жэнь Ци — выпускник; e-mail: msuphysrenqi@gmail.com.
4. Черников Владимир Антонович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел. (495) 939-38-85.