

УДК 537.52

О ПРИРОДЕ ЧЕТОЧНОЙ МОЛНИИ И ЛАБОРАТОРНЫХ “ПЛАЗМОИДОВ”

© 2020 г. Ю. Р. Аланакян^{1,*}, Д. А. Буланкин¹, В. Г. Певгов¹,
Л. В. Смирнов¹, А. А. Цветков¹

Представлено академиком РАН В.И. Пустовойтом 09.04.2019 г.

Поступило 07.06.2019 г.

После доработки 07.06.2019 г.

Принято к публикации 04.10.2019 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований электрического разряда в водной среде. В эксперименте наблюдалось образование в атмосферном воздухе светящихся шаров, которые иногда взрывались. Спектроскопические исследования показали наличие в плазме повышенного содержания атомарного водорода в подтверждение того, что образующиеся шары могут быть диффузно горящими водородными сгустками. Полученные результаты дают основание предполагать, что четочная молния — это такие же диффузно горящие водородные образования.

Ключевые слова: высоковольтный разряд, водная среда, плазменные образования, диффузное горение

DOI: 10.31857/S2686740020010034

При электрическом разряде в водной среде неоднократно наблюдали (см., например, [1, 2]) следующее явление. В атмосферном воздухе возникали светящиеся объекты шаровидной формы. Время жизни этих объектов зависит от радиуса шара и может достигать нескольких секунд. Например, в работе [1] удар молнии на водяной фонтан инициировался подводным взрывом. После разряда молнии в воздухе образовалась цепь светящихся шаров, т.е. возникала четочная молния. В работе [2] светящийся шар получали в результате моноимпульсного разряда конденсаторной батареи на разрядный промежуток, образованный двумя электродами, один из которых (кольцевой) помещался под водой, а другой (штыревой) непосредственно над поверхностью воды. Радиус шара составлял ~10 см со временем жизни около 1 с, что соответствует параметрам четочной молнии [3]. Заметим, что при коротких разрядных импульсах (менее 20 мкс) светящиеся объекты не образуются или же имеют более короткое время жизни.

Отличительной особенностью данных объектов является аномально большое время их существования (свечения) в сравнении со временем рекомбинации заряженных частиц в плазме. Тем

не менее во многих работах эти объекты называют плазмоидами, подразумевая под этим долгоживущую низкотемпературную плазму (см., например, [4]). Модель такой плазмы предложена Стахановым [5], который полагал, что заряженные частицы обволакиваются молекулами воды, образуя кластеры. Смирнов показал [6], что время жизни такой кластерной плазмы не больше, чем обычной, при этом энергия, содержащаяся в шаре, имеет химическую природу.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования, близкие по условиям к работе [2]. При этом установлена природа светящегося объекта. Это диффузное горение водорода, содержащегося в шаре. Химическая реакция горения протекает в узком сферическом слое. Кислород поступает сюда из окружающего воздуха диффузионным путем. Теории диффузно горящего шара посвящена работа [7], в которой показано, что в случае, когда в центральной части шара концентрация водорода велика (более 7%), горящий шар вначале расширяется. Затем устанавливается квазистационарное состояние, при котором поверхность горящего шара движется медленно по сравнению с диффузионными скоростями водорода и кислорода. Указан механизм образования сгустка водорода в плазме разряда.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Вода подавалась в плазменный реактор (PR) под давлением до 3 атм и с объемным расходом до 0.5 м³ в минуту. К электроразрядной камере от источника питания (PS) было подведе-

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., Россия

*E-mail: yralanak@mail.ru

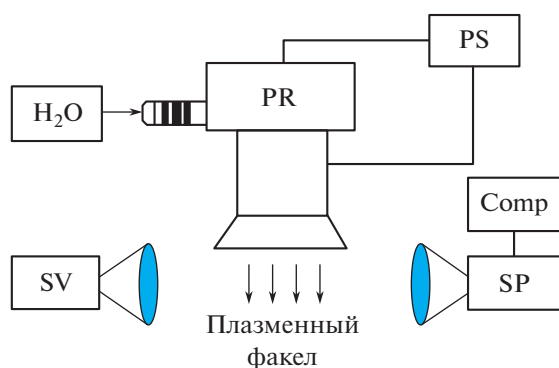


Рис. 1. Схема водяной электроразрядной установки (обозначения в тексте).

но частотно-импульсное напряжение с частотой следования прямоугольных импульсов 40 кГц, с напряжением в максимуме около 5 кВ с регулируемой длительностью импульсов. Изменение длительности импульса сопровождалось изменением вкладываемой в разрядный промежуток мощности, которая могла меняться вплоть до 4–5 кВт. Длительность импульсов могла изменяться от нескольких микросекунд до 24 мкс. Геометрический объем разрядного промежутка при этом составлял около 0.5 см³.

Спектры свечения пламени регистрировались на спектрофотометре (SP) Maya 2000 Pro (фирма “Ocean Optics”) с использованием ввода сигнала в спектрометр по оптическому волокну, входной конец которого позиционировался вблизи плазменного факела. Спектрофотометр, управляемый ЭВМ, позволял получать интегральный (усредненный по пространству и времени) спектр свечения плазмы в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм со спектральным разрешением около 1 нм. Скоростная видеокамера (SV) EXF1 фирмы “Casio” позволяла вести съемку со скоростью смены кадров до 1200 кадров в секунду.

Устройство, на котором изучались процессы образования светящихся объектов, реализовано на основе цилиндрического плазмохимического

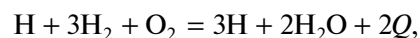
реактора (PR), подобного устройству, описанному в патенте 2 448 768 RU [8]. Поток воды в плазмохимический реактор подается тангенциально через входной штуцер в камеру формирования пленочного потока жидкости. В камере формирования при этом образуется тороидальный вихрь. После формирователя пленочного потока вода движется по спирали, покрывая внутреннюю поверхность внешнего цилиндра — внешнего электрода. Плазма зажигается в коаксиальном электроразрядном промежутке. Плазменный факел, выходящий из зоны разряда на расстояние до 5 см, позволяет проследить эволюцию светящегося шарообразного объекта при его движении в атмосферном воздухе.

На рис. 2 представлены последовательные кадры эволюции светящихся объектов, которые образовались в плазме во время разряда (рис. 2а). После окончания разряда (рис. 2б) эти объекты, разлетаясь, светятся ярче за счет сжатия до компактных размеров около 1 мм.

Спектроскопические исследования показали наличие в объектах атомарного водорода. На рис. 3 приведены спектрограммы в окрестности балмеровской линии H α при различных длительностях разрядного импульса. Повышенная концентрация водорода может быть интерпретирована в поддержку предположения, что шары представляют собой диффузно горящий водородный сгусток.

Отметим следующие свойства светящихся шаров. При сближении двух шаров они сливались, образуя шар большего радиуса. При механическом воздействии шары взрывались, например, при столкновении с препятствием. Размеры шаров зависели от продолжительности и мощности разряда. При этом радиусы шаров достигали нескольких миллиметров.

Горение водорода — это цепная реакция, брутто-уравнение которой можно записать в виде



где $Q = 282$ кДж/моль воды.

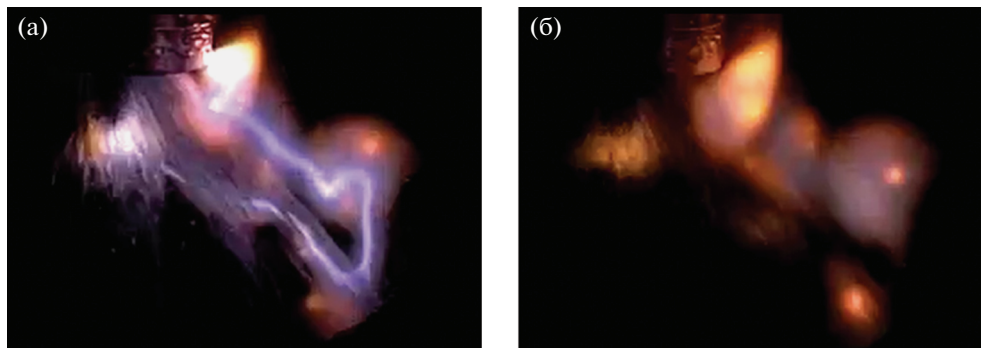


Рис. 2. Формирование светящихся объектов во время разряда (а) и их дальнейшая эволюция (б).

Энергия выделяется в основном в процессе ассоциации $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$. При этом молекулы водорода разлетаются во все стороны от точек поверхности сферы. Таким образом, возникает поток импульса от поверхности горения. Во внутренней области шара давление газа оказывается больше, чем во внешней области. Это способствует сохранению шарообразной формы объекта. При механическом воздействии на шар может образоваться гремучая смесь: реакция горения принимает взрывной характер.

В статье [7] было показано, что в центре шара при квазистационарном горении содержится около 7% водорода (независимо от радиуса шара). При этом учитывалось, что вдали от области горения в воздухе имеется 20% кислорода и предполагается, что происходит полное сгорание, т.е. концентрация водорода и кислорода на поверхности шара нулевые.

При сближении двух шаров область между шарами оказывается обедненной кислородом. Это означает, что реакция горения в этой области происходит с меньшей эффективностью. Следовательно, водород проникает в пространство между шарами. В результате объекты сливаются: образуется один шар большого радиуса. Теперь обсудим вопрос о том, как происходит разделение водорода и кислорода при электрическом разряде в водной среде.

Разделение тяжелых и легких частиц при электрическом разряде впервые наблюдал Капица [9]. При стационарном разряде в аргоновом газе, содержащем примесь дейтерия, он обнаружил, что в области разряда в плазменном шнуре сосредотачиваются только молекулы дейтерия. Теория этого явления изложена в работе [10]. Дело в следующем. Плазменный сгусток, образующийся в области разряда, находится в динамическом равновесии с окружающим газом: поток ионов из плазмы равен потоку нейтральных молекул, влетающих в плазму из окружающей среды. В граничной области плазмы всегда возникает амбиполярное электрическое поле, которое удерживает электроны и ускоряет ионы. То есть “следит” за тем, чтобы плазма оставалась квазинейтральной. Тяжелые молекулы, влетающие в плазму, движутся медленнее, ионизируются в области большого амбиполярного поля и выбрасываются из плазмы. Для процесса “самоочищения” плазмы от тяжелых частиц требуется определенное время. Поэтому при кратковременном разряде этот эффект не наблюдается. Образование сгустков водорода при разряде молнии в водной среде теоретически рассмотрено в работах [11, 12], где показано, что токовый канал молнии неустойчив. Он разбивается на равноудаленные шаровые образования. Экспериментальным подтверждением того, что четочная молния — это диффузно горящие

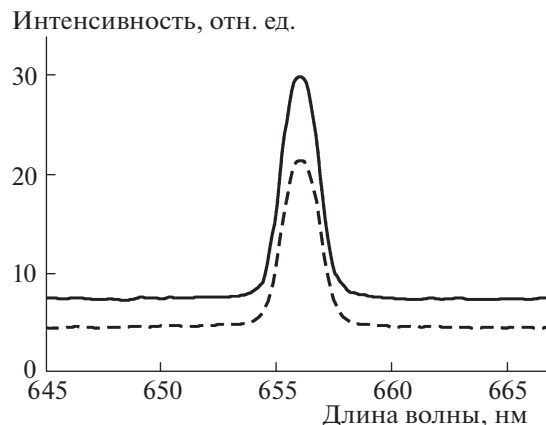


Рис. 3. Измерение спектра свечения плазменного факела (линия $\text{H}\alpha$ водорода). Верхняя кривая получена при длительности импульса 25 мкс, нижняя — при 10 мкс.

водородные шары, могло бы служить обнаружение атомарного водорода при наблюдении четочной молнии.

Полагаем, что диффузно горящие водородные шары могут образоваться при разряде не только в водной среде, но и в других веществах, содержащих водород. Например, в работе Слюсарева [13] светящиеся объекты в воздухе возникали при электрических разрядах в древесине. Очевидцы опытов Теслы сообщали, что при высокочастотном разряде в каучуке возникали светящиеся шарики, разбегающиеся из области разряда. Это были первые упоминания о светящихся объектах, полученных в лабораторных условиях.

Заметим, что многие авторы называют полученные ими светящиеся объекты шаровыми молниями. Полагаем, что природа объекта, рассматриваемого нами, существенно отличается от природы шаровой молнии. Например, по приведенным в [5] наблюдениям очевидцев, шаровая молния может совершать необычные перемещения и сильно воздействовать на работу электрических приборов. Возможно, шаровая молния является кольцевым вихрем в атмосферном воздухе, который способен автономно перемещаться в пространстве. В вихре сосредоточено само локализованное высокочастотное электромагнитное поле, под действием которого ионизируется окружающий воздух. Структура такой модели шаровой молнии и возможность ее образования обсуждается в работах [14, 15].

Таким образом, при электрическом разряде в среде, содержащей легкие атомы, происходит разделение легких и тяжелых частиц: в плазменной области сосредотачиваются легкие частицы. В настоящей работе исследован электрический разряд в водной среде. При этом в плазме накапливался водород. После рекомбинации плазмы в

атмосферном воздухе образовывался сгусток водорода, который диффузно сгорает. То есть химическая реакция протекает на границе сгустка, куда кислород и водород поступают диффузионным путем. Горение водородного газа сопровождается образованием атомарного водорода. Наблюдение в светящихся летающих объектах атомарного водорода является подтверждением нашего представления о природе объекта. Молекулы, образующиеся в результате химических реакций, разлетаются во все стороны с поверхности объекта, где происходит горение. Возникающий поток импульса от поверхности способствует поддержанию сферической формы объекта. Очевидно, что диффузное горение происходит в условиях, когда водород и кислород пространственно разделены. Под внешним воздействием они могут объединиться, что приводит к взрыву гремучей смеси.

Четочная молния возникает в атмосфере, достаточно насыщенной водой или органическими веществами, и представляет собой цепочку диффузно горящих водородных шаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Young G.A.* NOLTR 61-43, Naval Surface Weapons Center, 1962.
2. *Friday D.M., Broughton P.B., Lee T.A., Schutz G.A., Betz J.N., Lindsay C.M.* // J. Phys. Chem. A. 2013. V. 117. P. 9931.
3. *Барри Дж.* Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983.
4. *Егоров А.И., Степанов С.И., Шабалов Г.Д.* // УФН. 2004. Т. 174. С. 107.
5. *Стаханов И.П.* О физической природе шаровой молнии. М.: Науч. мир, 1996.
6. *Смирнов Б.М.* // УФН. 1975. Т. 116. С. 731.
7. *Аланакян Ю.Р.* // ДАН. 2007. Т. 415. С. 36.
8. Способ плазмохимической переработки сырья органического или растительного происхождения и устройство для плазмохимической переработки сырья органического или растительного происхождения: патент RU 2448768 Рос. Федерация / заявитель Певгов В. Г., патентообладатель Певгов В.Г. (RU). № 2010131660/05; заявл. 28.07.2010.; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. 20 с.
9. *Капица П.Л.* // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. С. 1801.
10. *Аланакян Ю.Р.* // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31. С. 518.
11. *Аланакян Ю.Р.* // ДАН. 2009. Т. 425. С. 328.
12. *Alanakyan Yu.R.* // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. 082106.
13. *Слюсарев Н.М.* Шаровая молния // Сб. тез. докл. семинара. Окт.-нояб. 1990. М.: Ин-т высок. температур, 1990. С. 18.
14. *Alanakyan Yu.R.* // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. 054501.
15. *Alanakyan Yu.R.* // Phys. Plasmas. 2017. V. 24. 044502.

ABOUT THE NATURE OF BEAD LIGHTNING AND LABORATORY "PLASMOIDS"

Yu. R. Alanakyan¹, D. A. Bulankin¹, V. G. Pevgov¹, L. V. Smirnov¹, and A. A. Tsvetkov¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS V.I. Pustovoi April 9, 2019

Received June 7, 2019

The results of experimental studies of an electric discharge in an aqueous medium are presented. In the experiment, the formation of luminous balls in the atmosphere was observed, which sometimes exploded. Spectroscopic studies showed the presence of increased atomic hydrogen abundance in the plasma in support of the fact that the balls formed could be diffusely burning hydrogen clots. The obtained results suggest that the bead lightning is the similar diffusely burning hydrogen formations.

Keywords: high voltage discharge, aqueous medium, plasma formations, diffuse burning