

Исследование высоковольтного разряда над поверхностью воды

Г.М. Сорокин, Л.Л. Рузан, И.Н. Германов*

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
428015, г. Чебоксары-15, Московский пр., 15

Поступила в редакцию 11.08.2010 г.

Исследуется газовый разряд, индуцированный в паровоздушной среде и позволяющий получить плазменные объекты со временем жизни от $1/30$ до $1/5$ с. С помощью цифровой системы фоторегистрации детально исследованы зарождение, образование и распад сферического плазмоида диаметром 10–12 см. Установлено, что рост влажности воздуха приводит к увеличению времени жизни плазмоида. Измерена вольт-амперная характеристика процесса и зависимости тока и напряжения от времени. Проведен анализ экспериментальных данных, и на его основе создана термодинамическая гипотеза плазмоида, которая объясняет его сферическую форму.

Ключевые слова: газовый разряд, плазмод, цифровая система регистрации, время жизни плазмоида, термодинамическая гипотеза; gas discharge, plasmoid, digital photographic system, lifetime of the plasmoid, thermodynamical hypothesis.

Введение

Изучение природного феномена шаровой молнии (ШМ) долгое время основывалось на наблюдениях очевидцев, однако на рубеже столетия плазменные образования, имеющие сходные с ШМ параметры, стали получать экспериментально, что позволило существенно приблизиться к пониманию природы ШМ. Особенно заслуживают внимания работы [1–3], в которых время жизни плазмоедов равно 1 с, что сравнимо со временем жизни природной ШМ. В этих работах наиболее точно моделируется среда, в которой образуется ШМ, а именно насыщенный водяными парами атмосферный воздух. Схемы установок, используемых в [1–3], разные, отличаются также время жизни (от 0,5–1 с в [1] до 2 с в [3]) и диаметры плазмоедов (10–18 см в [1] и 30–35 см в [3]).

Время жизни плазмоида зависит от множества факторов, влияние которых рассмотрено в [3]. Это размеры и форма электродов, напряжение между ними, величина и длительность импульса тока, температура и электропроводность воды, нанесенной на электрод. Среди этих факторов отсутствует такая важная характеристика, как влажность окружающего воздуха, тогда как известно [4], что при влажности, близкой к 100%, наблюдались плазмоеды при замыкании/размыкании электрических цепей на подводных лодках, не говоря уже о возникающих во время грозы природных ШМ.

В настоящей статье методом высоковольтного эрозионного разряда над поверхностью воды исследо-

ваны светящиеся плазменные образования со временем жизни от $1/30$ до $1/5$ с. С помощью цифровой системы фоторегистрации детально исследованы зарождение, образование и распад сферического плазмоида диаметром 10–12 см. Накоплен богатый материал. Измерены вольт-амперная характеристика $I(U)$ процесса и зависимости тока от времени $I(t)$ и напряжения от времени $U(t)$.

Форма плазмоида не всегда бывает шарообразной, наблюдались также грибообразные, кольцеобразные и вытянутые формы [1–3], но они обычно появляются на стадиях формирования и распада плазмоида. Сферическую форму, как это показано в настоящей статье, плазмод приобретает в середине процесса, но она до настоящего времени не получила четкого объяснения. Термодинамическая гипотеза плазмоида в первую очередь объясняет его сферическую форму. В основу этой гипотезы авторы положили анализ экспериментальных данных и теорию зародышеобразования Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица [5]. Эта модель позволяет также оценить по порядку величины такие параметры, как плотность поверхностной энергии и температура плазмоида. Также объясняется влияние изменения влажности и температуры окружающего воздуха на время жизни плазмоида.

Экспериментальная установка и результаты опытов

Исследовались высоковольтные газовые разряды в атмосфере при нормальном давлении и при изменении влажности воздуха. Для этого нами разработана и создана экспериментальная установка по наблюдению шаровой молнии. Установка состоит

* Геннадий Михайлович Сорокин (gensorokmich@mail.ru); Людмила Люциановна Рузан; Иван Николаевич Германов.

из разрядной камеры, высоковольтного блока питания, цифровой системы фоторегистрации с дальнейшим накоплением и компьютерной обработкой снимков лабораторной шаровой молнии и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для измерения вольт-амперных характеристик разряда (рис. 1 и 2).

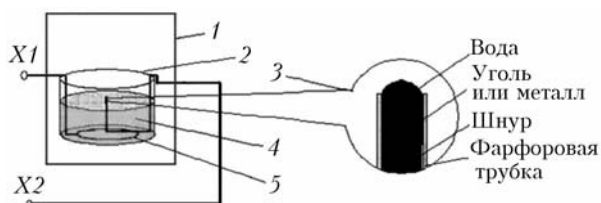


Рис. 1. Принципиальная схема разрядной камеры

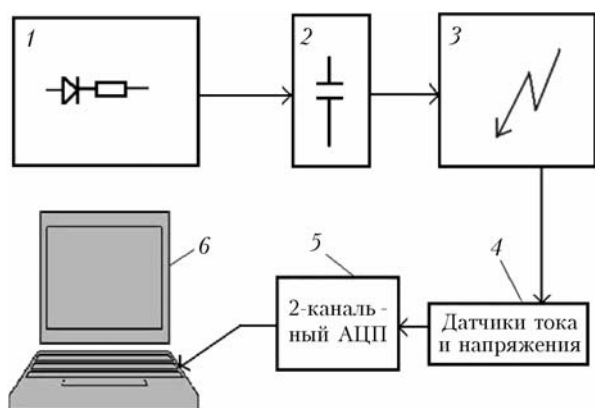


Рис. 2. Блок-схема цифровой системы измерения вольт-амперной характеристики: 1 – блок зарядки батареи конденсаторов; 2 – батарея конденсаторов емкостью $C = 300 \text{ мкФ}$, $U = 7 \text{ кВ}$; 3 – разрядная емкость; 4 – датчики тока и напряжения, подключенные к разряднику; 5 – 2-канальный АЦП; 6 – компьютер для записи данных с АЦП

К выводам $X1$ и $X2$ (рис. 1) подключаются накопительная батарея конденсаторов и механический

коммутатор из двух медных круглых пластин, которые разделены диэлектрической двухметровой штангой (на схеме не указаны). Камера 1 служит для создания влажности воздуха в разрядной емкости 2, которая выполнена из пластика высотой 25 см и диаметром 40 см и заполнена водой 4. Положительный электрод выполнен в виде кольца 5 и расположен на дне емкости. Отрицательный электрод 3 заключен в фарфоровую трубку диаметром 3 мм (в некоторых экспериментах применялись 5- и 10-мм трубки), возвышающуюся над поверхностью воды на 4 мм. Следует отметить, что данная часть установки имеет внешнее сходство с установкой, которая описана в работах [1, 2]. Однако наша установка отличается размерами, устройством электродов и наличием камеры для создания в наших экспериментах дополнительной температуры и влажности атмосферного воздуха.

В ходе экспериментов менялись мощность разряда, плотность водяных паров и другие параметры, влияющие на форму и время жизни плазменного сгустка.

Над поверхностью воды расположен коаксиальный электрод, содержащий несколько капель воды. При электрическом разряде над поверхностью воды образовывался шаровой формы плазмоид. Время жизни плазмоида изменялось от $1/30$ до $1/5$ с.

Получен многообразный цифровой фотоматериал. На рис. 3 представлены различные стадии существования плазмоида.

Анализ цветных фотографий плазмоидов показывает, что наблюдается радиальное изменение цвета ШМ: в центре ярко-белый, далее – желтый и край плазмоида – красный. Желто-оранжевый цвет создается свечением молекул азота, который в воздухе содержится в наибольшем количестве.

Для изучения влияния влажности воздуха была изготовлена специальная камера, в которой изменялась влажность воздуха. В первой серии опытов относительная влажность воздуха φ_1 была равна 79%.

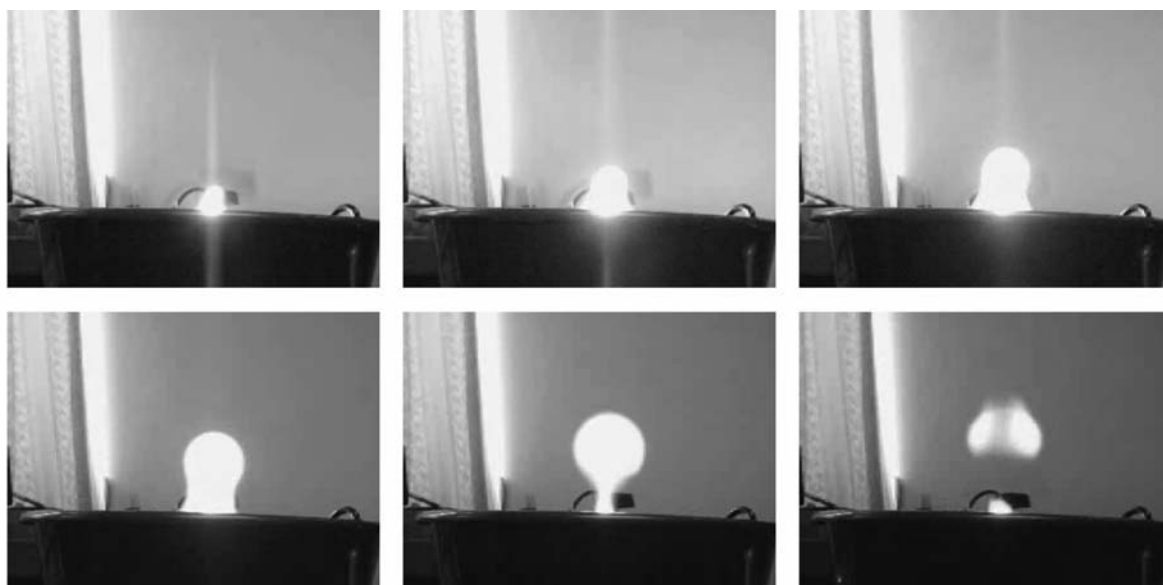


Рис. 3. Развертка по времени паровоздушного разряда

Во второй серии она была повышена методом нагнетания в камеру пара от кипящей жидкости, при этом температура воздуха в камере повысилась на $\Delta T = 8$ К в области разряда. Поскольку освещенность, местоположение цифровой камеры, степень зарядки конденсаторов не изменялись, то данные экспериментов по фотоснимкам показали, что происходит рост времени жизни плазмоида с увеличением влажности воздуха, причем стадия, когда плазмоид все еще имеет различимые формы, увеличилась на 1 кадр, т.е. не менее чем на 30 мс. Повышение температуры воздуха на ΔT во второй серии эксперимента также повлияло на ход процесса увеличения времени жизни плазмоида. О совместном влиянии этих факторов будет сказано в заключении.

Были измерены временные характеристики тока и напряжения разряда при комнатной влажности воздуха. На центральный угольный электрод диаметром 3 мм наносилось примерно 0,1 мл водопроводной воды. Центральный электрод выступал над поверхностью воды на (4 ± 2) мм. Начальное напряжение батареи конденсаторов составляло (5000 ± 375) В.

Зависимость тока разряда от времени приведена на рис. 4, а, зависимость напряжения от времени — на рис. 4, б. На представленных кривых имеются неоднородности, которые отражают различные физические процессы в плазме.

Вид кривой $I(t)$ после прохождения максимума объясняется разрядкой конденсаторов на сопротивление цепи разрядной камеры (500 Ом).

На рис. 4, б можно наблюдать несколько особенностей: излом в окрестностях 0,018 и 0,037 с и плато вблизи 0,08 с. Эти особенности проявляются во всех проведенных экспериментах.

На рис. 4, в представлена измеренная вольт-амперная характеристика при указанных ранее условиях разряда. Начиная с напряжения порядка 2300 В наблюдается возрастающая вольт-амперная характеристика с образованием максимума при 4500 В. При еще больших напряжениях наблюдается уменьшение тока. На всех участках проявились изломы, что соответствует аномальным процессам в разряде. Абсолютная ошибка указанных характеристик не превышает 7%.

Термодинамическая гипотеза

На основе экспериментальных данных авторы выдвигают следующую гипотезу. Плазмоид (шаровая молния) рассматривается как зародыш новой термодинамической фазы (плазмы) в другой термодинамической фазе (газ) воздушной среды. В изотропной среде зародыш приобретает сферическую форму, в случае одноосной анизотропии вытягивается в определенном направлении. В нашей установке наблюдаются оба случая. Когда полная энергия зародыша мала, электрическое поле катода вытягивает его вдоль поля, по мере увеличения собственной энергии зародыш приобретает сферическую форму.

Согласно теории зародышеобразования Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица при фазовых переходах [5]

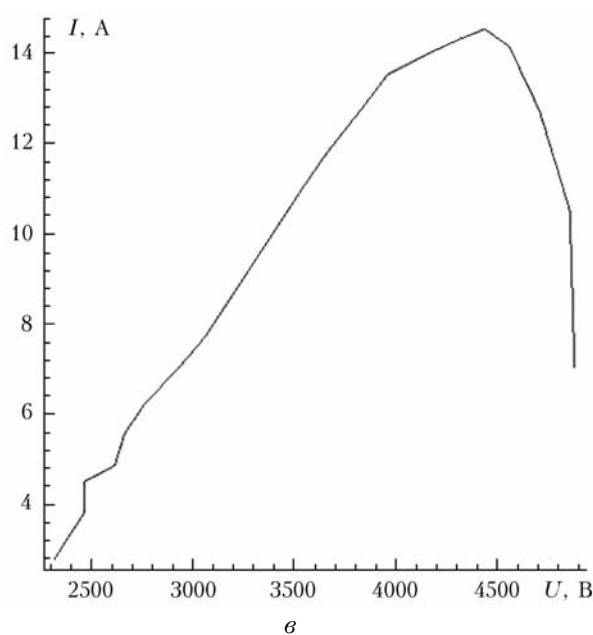
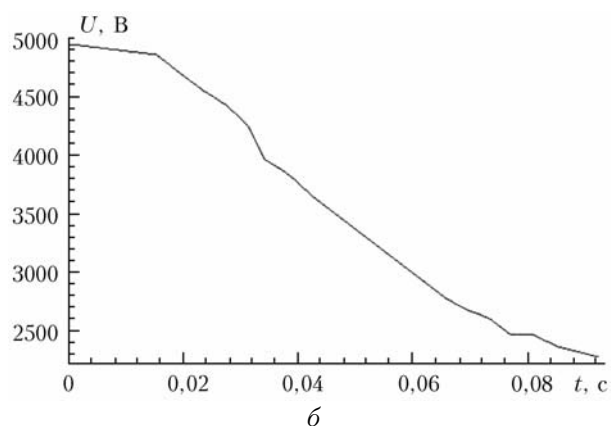
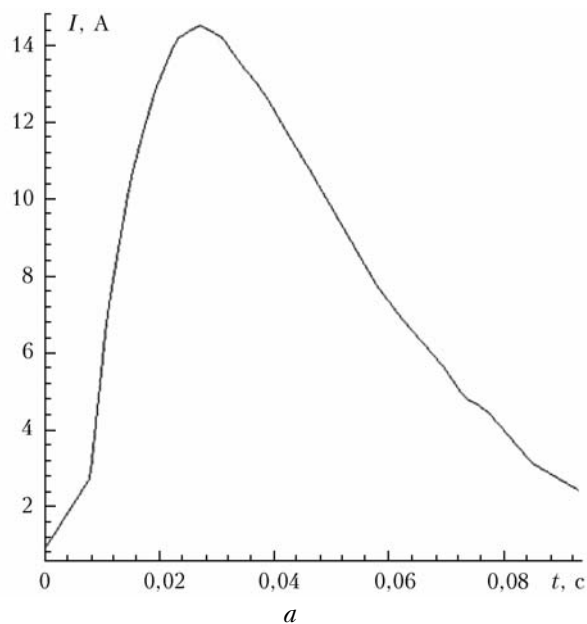


Рис. 4. Зависимость тока (а) и напряжения (б) на электродах от времени; вольт-амперная характеристика паровоздушного разряда (в)

радиус равновесного зародыша определяется соотношением

$$r = 2\alpha/(p' - p). \quad (1)$$

Здесь p' — давление внутри зародыша, p — давление атмосферного воздуха; α — коэффициент поверхностного натяжения. В [5] рассматривался конкретный случай образования пузырьков пара в жидкости; в общем случае α — плотность энергии границы раздела фаз. Величина α для границы раздела «плазмоид—воздух», вообще говоря, неизвестна, в [6] приведена оценка в гауссовой системе $2-5$ эрг/см, а СИ — $(2-5) \cdot 10^{-5}$ Дж/м. Величина r , или размер плазмоида, определяется из наблюдений. На нашей установке получают зародыши плазмы $r \approx 5 \div 6$ см.

Заметим, что перед зарождением плазмоид находится в мощном электрическом поле установки, природная шаровая молния — в насыщенной электричеством атмосфере. Это поле создает дополнительное давление $p_E = \epsilon E^2/(8\pi)$. Считая поле однородным, запишем потенциал в виде $\phi = -Er$. Отсюда давление внутри плазмоида:

$$p' = p_i + p_a + p_w + p_E, \quad (2)$$

где $p_i = \sum N_i kT$ — давление, обусловленное ионами, $p_a = \sum N_a kT$ — давление, обусловленное нейтральными атомами, p_w — дополнительное давление, возникающее в атмосфере насыщенного водяного пара. Давление p_w , очевидно, пропорционально плотности водяных паров $\rho = m/V$ и объему V плазмоида, поэтому оно не будет зависеть от r , а определяется числом молекул воды. Это утверждение находится в согласии с кластерной гипотезой И.П. Стаханова [6], в которой каждый образующийся при диссоциации воды отрицательный ион гидроксид-ион OH^- становится центром притяжения нейтральных молекул воды, обладающих большим дополнительным моментом. В результате образуется аналог крупной молекулы — кластерный ион, который задерживает рекомбинацию и увеличивает время жизни шаровой молнии.

Здесь не учитывались давление излучения, которым в слабо ионизированной плазме можно пренебречь, а также $p_i \ll p_a$.

Перепишем формулу (1) в виде

$$p' - p = 2\alpha/r$$

и продифференцируем по r . Очевидно, что $p = \text{const}$, а из всех компонент давления в формуле (2) от r будет зависеть лишь p_E .

Получим

$$2A/r^3 = 2\alpha/r^2, \text{ или } \alpha = A/r, \quad (3)$$

где $A = \epsilon\phi^2/(8\pi) = \text{const}$. Хотя напряжение на катоде меняется в некоторых пределах ($4 \div 8$ кВ), можно для определенности принять значение 7 кВ, при

котором получают наиболее хорошие плазмоиды. Из формулы (3) можно определить либо равновесный диаметр при известной α , либо α , если известен радиус плазмоида r . Диаметр зародыша можно оценить в 10–12 см. Предположим, что $\epsilon/8\pi$ даст минус 2 порядка, и учтем $1 \text{ В} = 1/300 \text{ units CGSE}$, тогда граничная плотность энергии составит

$$\alpha_{\text{пл}} \approx 4 \text{ эрг/см}^2 \text{ или } 4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2.$$

Полученная оценка согласуется с результатом И.П. Стаханова [6]:

$$\alpha = 2 \div 5 \text{ эрг/см}^2 [(2-5) \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2].$$

Заключение

Одним из условий термодинамического равновесия фаз является равенство температур $T' = T$ внутри и вне плазмоида. Но время жизни плазмоидов порядка 1 с, т.е. они не стабильны, поэтому температура T' фактически может отличаться от T в сторону повышения, но ненамного. В экспериментальной работе А.И. Егорова и С.И. Степанова [2] плазмоиды, отрываясь от электрода, поднимались вверх, и по скорости подъема температура плазмоида была оценена в 320 К. Как видно, эта оценка подтверждает наши выводы.

В статье показаны результаты цифровой съемки паровоздушного разряда, в которых зафиксированы процессы зарождения, возникновения и распада сферических плазмоидов. Показано, что увеличение влажности воздуха приводит к увеличению времени их жизни. Приведен анализ вольт-амперной характеристики, полученной в режиме *on-line* на персональном компьютере.

Согласно [7] в условиях подводных лодок долгоживущие плазмоиды образуются при замыкании-размыкании электрических цепей, поэтому следует ожидать, что совместное воздействие увеличения температуры окружающей среды и влажности приведет к увеличению времени жизни. Именно такое сочетание условий было реализовано в наших опытах.

Авторы также экспериментально исследовали развитие конвективной неустойчивости при распаде плазмоида и намерены представить результаты в следующей статье.

Выражаем благодарность А.М. Бойченко за плодотворное обсуждение результатов работы.

1. Егоров А.И., Степанов С.И. Долгоживущие плазмоиды — аналоги шаровой молнии, возникающие во влажном воздухе // Ж. техн. физ. 2002. Т. 72, вып. 12. С. 102–104.
2. Егоров А.И., Степанов С.И. Свойства короткоживущих шаровых молний, полученных в лаборатории // Ж. техн. физ. 2008. Т. 78, вып. 6. С. 15–19.
3. Фурув Л.В. Получение автономных долгоживущих плазменных образований в свободной атмосфере // Ж. техн. физ. 2005. Т. 75, вып. 3. С. 98–101.
4. Бойченко А.М. Шаровые молнии с временем жизни t меньше 1 с // Ж. техн. физ. 1999. Т. 69, вып. 10. С. 131–134.

5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1. М.: Наука, 1976. 528 с.
6. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 123 с.
7. Boichenko A.M. Formation of bead and specific ball lightnings upon powerful pumping of gas medium // Phys. of Wave Phenomena. 2005. V. 13, N 2. P. 104–112.

G.M. Sorokin, L.L. Ruzan, I.N. Germanov. **Research of the high-voltage discharge above the water surface.**

The gas discharge is investigated, induced in the air-vapor region and allowing us to obtain plasma objects with a lifetime of $1/30$ to $1/5$ s. The birth, formation, and decay of the spherical plasmoid with a diameter about 10–12 cm is investigated in detail with a digital photographic system. It was fixed that the increasing of humidity leads to the increasing lifetime of the plasmoid. Current-voltage characteristic of the process was measured and the dependence of the current and voltage on the time. The analysis of experimental data was conducted and, based on it, a thermodynamical hypothesis of the plasmoid was created, which explained its spherical shape.