

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Ещё раз о гатчинском разряде и шаровой молнии

(комментарий к статье Г.Д. Шабанова "О возможности создания природной шаровой молнии импульсным разрядом нового типа в лабораторных условиях" [УФН 189 95 (2019)])

М.Л. Шматов

Показано, что недавняя статья Г.Д. Шабанова [УФН 189 (1) 95 (2019)] содержит несколько важных необоснованных и ошибочных утверждений. В частности, представленная в этой статье оценка заряда средней шаровой молнии соответствует невозможной ситуации с приблизительно стократным превышением напряженностью электрического поля вблизи внешней границы шаровой молнии величины, соответствующей пробой воздуха при условиях, близких к нормальным.

Ключевые слова: гатчинский разряд, долгоживущие светящиеся образования, шаровая молния, электрический пробой воздуха

PACS numbers: 51.50.+v, 52.80.Mg, 92.60.Pw

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.05.038621>

В недавней статье Г.Д. Шабанова [1] представлен подробный обзор экспериментов по созданию долгоживущих светящихся образований электрическим разрядом над поверхностью воды, получившим название "гатчинского". Наряду с важными данными, необходимыми для воспроизведения таких образований, и ценной информацией об их свойствах, статья [1] содержит три принципиально важных, но необоснованных утверждения, а также два ошибочных утверждения.

В разделе 6 [1] утверждается, что объекты, создававшиеся в экспериментах Г.Д. Шабанова [2, 3] и У. Фанц (U. Fantz) с коллегами [4] (в данной ситуации термины "объект" и "долгоживущее светящееся образование" являются синонимами), "имеют разную природу" (в статье [1] работы [2–4] цитируются как работы [1, 2, 29] соответственно). Это утверждение основано на оценке энергии долгоживущего светящегося образования из работы [4] (в самой работе [4] такое образование называется "плазмодом") и результатах проведенного Г.Д. Шабановым эксперимента с использованием алюминиевого диска толщиной 0,1 мм и диаметром приблизительно 120 мм с отверстием диаметром приблизительно 30 мм [1]. Диск был подвешен на диэлектрических нитях на высоте приблизительно 20 мм над поверхностью воды, используемой при проведении разряда [1]. При наличии диска долгоживущее светящееся образование не возникало, после разряда на диске был обнаружен оплавленный участок [1]. Масса оплавленного металла

составляла 2–4 мг, что "соответствует 2–4 Дж израсходованной энергии" [1]. В работе [4] приведена оценка, согласно которой при энергии разряда $E \approx 19$ кДж энергия плазмоида E_{plasmoid} приблизительно равна $0,22E$. В эксперименте с диском $E = 7,2$ кДж, предположение о передаче 22 % этой энергии светящемуся образованию соответствует его энергии, приблизительно равной 1,6 кДж [1]. Утверждение о разной природе объектов обосновывается только тем, что последняя величина значительно превышает 1–2 Дж: "Если [в эксперименте с диском] светящееся образование успело сформироваться, то после взаимодействия с выделением энергии 1–2 Дж оно сразу исчезает, не проявляя наличия нескольких килоджоулей" [1].

Недостаточность такого обоснования видна, прежде всего, из того, что в работе [1] не оценивается и даже не упоминается энергия, затраченная на нагрев алюминия, воды и воздуха. Масса диска составляла приблизительно 2,9 г. Если он нагревался, например, от 20 °С до средней температуры 100–200 °С, то только на этот нагрев затрачивалось приблизительно 210–490 Дж (см. [5]), что как минимум в 100 раз превосходит энергию, необходимую для плавления 2–4 мг алюминия.

Следует также учитывать, что согласно данным, приведенным в работе [4], в экспериментах У. Фанц с коллегами величина 0,22 фактически являлась верхней границей отношения E_{plasmoid}/E и могла существенно превосходить его реальное значение. Дело в том, что E_{plasmoid} находилась интегрированием по времени расчётного значения мощности P_{plasmoid} энерговыделения в плазмод [4]. При этом P_{plasmoid} находилась как разница между полной мощностью энерговыделения P_{total} и мощностью P_{water} диссипации энергии в воде, оцениваемой как $I(t)^2 R_{\text{water}}$, где I — ток, проходящий через воду и область формирования плазмоида, t — время, R_{water} — сопротивление водяного резервуара [4]. Предполагалось, что R_{water} не

М.Л. Шматов. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая 26, 194021 Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: M.Shmato@mail.ioffe.ru

Статья поступила 13 мая 2019 г.

зависит от времени и совпадает с минимальным значением полного сопротивления цепи R , приблизительно равным 88 Ом и соответствующим $t \approx 15$ мс (время отсчитывалось от момента начала разряда). Согласно данным, представленным в [4], R_{water} в основном определялось сопротивлением воды между электродами, один из которых — погружённый в воду медный диск с отверстием в центре, а другой — созданное разрядом плазменное облако над её поверхностью. Площадь S_c поверхности контакта этого облака с водой зависела от времени [4], тогда как приближение $R_{\text{water}} = \text{const} \approx 88$ Ом не учитывает данный эффект. В результате уменьшения S_c со временем после достижения максимального значения могло привести к существенному занижению P_{water} и, соответственно, завышению P_{plasmoid} на стадии уменьшения S_c . Подчёркнём, что при $t \approx 155$ мс, когда прекращался разряд и начиналось автономное существование плазмоида, R составляло приблизительно 260 Ом, т.е. приблизительно в три раза превышало минимальное значение этого параметра, выбранное в качестве R_{water} [4].

Утверждение "Идентичное поведение светящихся образований и природной шаровой молнии не оставляет сомнения в их одинаковой природе" в заключении работы [1] также необоснованно. Прежде всего, "гатчинский разряд" ещё не привёл к созданию долгоживущих светящихся образований с временем жизни, превышающим 1–2 с, тогда как время существования шаровой молнии (или, согласно терминологии [1], "природной шаровой молнии") может достигать, как минимум, нескольких десятков секунд (см., например, [6–9]). Кроме того, объёмная плотность энергии шаровой молнии ρ_E^{bl} может достигать, как минимум, нескольких сотен Дж см⁻³. Так, например, наблюдательные данные из работы [8] соответствуют $\rho_E^{\text{bl}} \geq 620$ Дж см⁻³. Возможность создания "гатчинским разрядом" долгоживущих светящихся образований с сопоставимыми объёмными плотностями энергии пока не установлена.

Ранее возможность различия механизмов, обеспечивающих существование шаровой молнии и плазмоидов, создаваемых разрядом над поверхностью воды, упоминалась в работе [10].

Аргументы, представленные выше, показывают необоснованность ещё одного утверждения из заключения статьи [1], а именно — утверждения "развитый в наших работах подход позволил создать в лабораторных условиях аналог природной шаровой молнии и тем самым заложил основы её систематического изучения".

Следует также отметить, что светящиеся образования, воспроизводимы создаваемые в результате возбуждения воздуха и существующие до 1–2 с после прекращения возбуждающего воздействия, известны с конца 1960-х годов [11–15]. Их сравнительно длительное существование обусловлено запасанием энергии на метастабильных уровнях молекулы кислорода [12, 13]. Возбуждение воздуха осуществлялось радиоволнами [11–15]; в работах [12, 13] обсуждалась возможность такого же запасания энергии и последующей люминесценции воздуха при его возбуждении электрическим разрядом.

Визуальное сходство долгоживущих светящихся образований, создаваемых как "гатчинским разрядом", так и радиоволнами, с шаровой молнией может быть связано с возбуждением воздуха вблизи шаровой молнии. Предположения такого рода делались и ранее [12, 13, 16].

Ошибочные утверждения представлены в разделе 7 работы [1]. Они заключаются в оценке заряда шаровой молнии Q (в статье [1] используется термин "нескомпенсированный заряд") и предположении об уравнивании давления, вызываемого существованием этого заряда, "давлением оболочки из полярного диэлектрика" (это предположение обосновывается только ссылкой на работу [17], цитируемую как работа [64]). Подчёркнём, что в работе [1] и ниже говорится только об электрическом заряде, локализованном в пределах видимой границы шаровой молнии. Обсуждение возможности частичной локализации электрического заряда вне этой границы представлено в работе [18] и выходит за рамки данного комментария.

В работе [1] приведена оценка, согласно которой у средней шаровой молнии $Q = 4 \times 10^{-4}$ Кл, при этом полагается, что диаметр шаровой молнии d равен 24 см. В такой ситуации напряжённость электрического поля на границе шаровой молнии ϵ_b была бы приблизительно равна $2,5 \times 10^6$ В см⁻¹. При условиях, близких к нормальным, эта величина приблизительно в 100 раз превышает величину, соответствующую пробоею воздуха, что делает длительное существование электрического поля с напряжённостью, близкой к $2,5 \times 10^6$ В см⁻¹, невозможным (см., например, [9], где полагается, что $\epsilon_b \leq 25,5$ кВ см⁻¹, и [19]).

В работе [17] сделана попытка обоснования предположения о возможности стабилизации шаровой молнии, основной частью которой является сфера с большим положительным электрическим зарядом Q (при радиусе сферы $R_0 = 7$ см $Q = 3 \times 10^{-3}$ Кл) внешним давлением атмосферы "из поляризованных молекул воды, которые соберутся вокруг заряженной сферы". Представленная при этом количественная модель основана на нескольких ошибочных предположениях. Рассмотрим два основных.

Прежде всего, предполагается, что поляризация и, как следствие, потенциальная энергия молекул воды определяются исключительно электрическим полем заряженной сферы (диполь-дипольное расталкивание упоминается только как эффект, предотвращающий конденсацию водяного пара) [17]. При этом приводится пример, согласно которому вблизи внешней поверхности данной сферы давление составляет $2,2 \times 10^8$ н м⁻², а температура T равна 300 К [17]. При таких параметрах концентрация молекул воды соответствует конденсированному состоянию вещества (анализ попытки авторов [17] обосновать описание воды в рассматриваемой и близлежащих областях как газа выходит за рамки данного комментария).

Второе из этих предположений состоит в том, что ориентационная поляризуемость молекулы воды равна $p_0^2 \epsilon / (3kT)$, где p_0 — дипольный момент молекулы, ϵ — напряжённость электрического поля (в [17] она обозначена через E), k — постоянная Больцмана, при $T = 300$ К и $\epsilon = 5,5 \times 10^9$ В м⁻¹ (последняя величина — напряжённость электрического поля на внешней границе сферы, соответствующая представленному в [17] условию стабильности шаровой молнии). В действительности применимость такого описания ориентационной поляризуемости ограничена условием $\epsilon \ll kT/p_0$ [20, 21], что при температуре 300 К соответствует $\epsilon \ll 6,7 \times 10^8$ В м⁻¹ (использовано значение $p_0 \approx 1,855$ Д $\approx 6,188 \times 10^{-30}$ Кл м [22]).

Использование каждого из рассмотренных предположений приводит, при фиксированных значениях Q и R_0 , к

существенному завышению силы, действующей на молекулу воды, находящуюся на фиксированном расстоянии от заряженной сферы, и в итоге к существенному завышению давления молекул воды на эту сферу.

Автор благодарит проф. К.Д. Стефана (Prof. K.D. Stephan) за полезное обсуждение вопросов, затронутых в данном комментарии.

Список литературы

1. Шабанов Г Д *УФН* **189** 95 (2019); Shabanov G D *Phys. Usp.* **62** 92 (2019)
2. Shabanov G D, in *Proc. 3rd Intern. Conf. Natural and Anthropogenic Aerosols, St. Petersburg, September 24–26, 2001*, p. 368
3. Шабанов Г Д *Письма в ЖТФ* **28** (4) 81 (2002); Shabanov G D *Tech. Phys. Lett.* **28** 164 (2002)
4. Fantz U et al. *J. Appl. Phys.* **114** 043302 (2013)
5. Зиновьев В Е *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник* (М.: Металлургия, 1989)
6. Дмитриев М Т *ЖТФ* **39** 387 (1969); Dmitriev M T *Sov. Phys. Tech. Phys.* **14** 284 (1969)
7. Singer S *The Nature of Ball Lightning* (New York: Plenum Press, 1971); Пер. на русск. яз.: Сингер С *Природа шаровой молнии* (М.: Мир, 1973)
8. Дмитриев М Т, Бахтин Б И, Мартынов В И *ЖТФ* **51** 2567 (1981); Dmitriev M T, Bakhtin B I, Martynov V I *Sov. Phys. Tech. Phys.* **26** 1518 (1981)
9. Смирнов Б М *УФН* **162** (8) 43 (1992); Smirnov B M *Sov. Phys. Usp.* **35** 650 (1992)
10. Stephan K D et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **22** 025018 (2013)
11. Powell J R et al. *Bull. Am. Phys. Soc.* **12** 751 (1967)
12. Powell J R, Finkelstein D *Adv. Geophys.* **13** 141 (1969)
13. Powell J R, Finkelstein D *Am. Scientist* **58** 262 (1970)
14. Ohtsuki Y H, Ofuruton H *Nature* **350** 139 (1991)
15. Зарин А С, Кузовников А А, Шибков В М *Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе* (М.: Нефть и газ, 1996)
16. Shmatov M L J. *Plasma Phys.* **81** 905810406 (2015)
17. Зайцев И В, Зайцев С В *Письма в ЖТФ* **17** (7) 34 (1991); Zaitsev I V, Zaitsev S V *Sov. Tech. Phys. Lett.* **17** 249 (1991)
18. Shmatov M L J. *Plasma Phys.* **69** 507 (2003)
19. Райзер Ю П *Физика газового разряда* 3-е изд. (Долгопрудный: Интеллект, 2009); Пер. на англ. яз.: Raizer Yu P *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer, 1997)
20. Kittel Ch *Introduction to Solid State Physics* 4th ed. (New York: Wiley, 1971); Пер. на русск. яз.: Киттель Ч *Введение в физику твердого тела* (М.: Наука, 1978)
21. Сивухин Д В *Общий курс физики. Том 3 Электричество* (М.: Наука, 1977)
22. Маленков Г Г, в *Физическая энциклопедия* (Гл. ред. А М Прохоров) Т. 1 (М.: Советская энциклопедия, 1988) с. 294

Once again on the Gatchina discharge and ball lightning

(comments on G.D. Shabanov's paper "On the possibility of making natural ball lightning using a new pulse discharge type in the laboratory" [*Phys. Usp.* **62** 92 (2019); *Usp. Fiz. Nauk* **189** 95 (2019)])

M.L. Shmatov

Ioffe Institute,

ul. Politekhnikeskaya 26, 194021 St. Petersburg, Russian Federation

E-mail: M.Shmatov@mail.ioffe.ru

It is shown that a recent paper by G.D. Shabanov [*Phys. Usp.* **62** 92 (2019); *Usp. Fiz. Nauk* **189** 95 (2019)] contains several important unsubstantiated and erroneous statements. In particular, the estimate of the discharge of an average ball lightning presented in this paper corresponds to the impossible situation with the approximately 100-fold excess of the electric field strength near the external boundary of the ball lightning over the air breakdown field under nearly standard conditions.

Keywords: Gatchina discharge, long-lived luminous formations, ball lightning, electric air breakdown

PACS numbers: **51.50.** + v, 52.80.Mg, 92.60.Pw

Bibliography — 22 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **190** (1) 107–109 (2020)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.05.038621>

Received 13 May 2019

Physics–Uspekhi **63** (1) (2020)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.05.038621>