

О соотношении теоретической и экспериментальной составляющих в работах по шаровой молнии

(ответ на комментарий М.Л. Шматова [УФН 190 107 (2020)])

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

Г.Д. Шабанов

В письме М.Л. Шматова [УФН 190 107 (2020)] дана высокая оценка экспериментальной части работы Г.Д. Шабанова [УФН 189 95 (2019)], но высказаны и некоторые критические замечания теоретического характера. В настоящем ответе покажем, что эти замечания основаны на недоразумении, связанном с излишне однозначной трактовкой элементарных законов физики без учёта возможного многообразия их проявлений в конкретных условиях.

Ключевые слова: гатчинский разряд, долгоживущие светящиеся образования, макроскопическое разделение зарядов, заряженные тела, средняя пробивная напряжённость, шаровая молния

PACS numbers: 01.50.My, **01.55. + b**, **05.65. + b**, 41.20.Cv,
51.50. + v, 52.80.Mg, 92.60.Pw

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.12.038705>

Не всё из того, что кажется очевидным на первый взгляд, происходит на самом деле при определённых условиях. Например, взаимодействие двух одноимённо заряженных проводящих шаров, как известно, не подчиняется закону Кулона на близких расстояниях, но не до такой же степени, чтобы почти всегда притягиваться. Однако нет, в 1999 г. эту задачу рассмотрел В.А. Саранин [1] и численно установил, что притяжение двух одноимённо заряженных проводящих шаров — такое же распротранённое явление, как и отталкивание. Чуть позже, в работе "Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия двух проводящих заряженных шаров" он с соавтором уточнили теоретическую часть и показали это экспериментально [2].

Это небольшое вступление к утверждению в тексте [3], которое дополнительно вынесено в аннотацию перед основным текстом и сформулировано следующим образом: "...представленная в этой статье оценка заряда средней шаровой молнии соответствует невозможной ситуации с приблизительно стократным превышением напряжённостью электрического поля вблизи внешней границы шаровой молнии величины, соответствующей пробоем воздуха при условиях, близких к нормальным". Автор [3], как видно из двукратного повторения, считает это основной нелепостью в статье [4]. Обратимся к книге [5] (учебное пособие для студентов), написанной экспериментатором с 30-летним стажем и не менее известным в физике газового разряда теоретиком Э.М. Базеляном и Ю.П. Райзером, которая вместе с работой [2] является прекрасным руководством для анализа процессов, происходящих с заряженными телами. В работе [4], ввиду её определённой направленности, этот вопрос тщательно не рассматривался, а была дана только ссылка на нашу статью [6] (в статье [4] это ссылка под номером [15]),

где эта якобы проблема, по мнению автора письма [3], была рассмотрена. В статье [6] мы дали ссылку на книгу [7], так как она является более поздней по отношению к работе [5] тех же авторов, а в целом оба издания дополняют друг друга. Вопрос о существовании заряженных тел с полем на их поверхности, большим "пробойного" (по терминологии [3]), рассмотрен в [5, 7] на уровне лабораторной работы. Оппонент [3] взял для расчёта "пробойное" поле 30 кВ см^{-1} , необходимое, как он считает, для пробоя воздушного промежутка (ведь нужно пробить какие-то конкретные мм, см или метры), и получил "невозможную ситуацию" со "стократным превышением" поля, необходимого для пробоя воздушного промежутка. Действительно, для начала коронирования необходимо на поверхности электрода поле 30 кВ см^{-1} . Коронирование, как известно, может начаться и продолжаться часами [5]. Однако в общем случае для пробоя необходимо на электроде иметь напряжение, которое рассчитывается исходя из "средней пробивной напряжённости" воздушных промежутков при нормальных атмосферных условиях [5]. Эта величина является средним электрическим полем на промежутке (вот где появляется виртуальный промежуток), и имеет довольно широкий диапазон, который зависит от многих параметров и с достаточно хорошим приближением лежит в интервале от 30 кВ см^{-1} до 5 кВ см^{-1} .

Далее рассмотрим задачу для лабораторной работы. Пусть шаровая молния с радиусом 5 см (достаточно часто наблюдаемый размер) находится в 1,5 м над поверхностью земли (как правило, на такой высоте) и движется параллельно поверхности земли. Необходимо рассчитать, какое напряжение нужно подать на этот шарик (шаровую молнию) относительно земли, чтобы он оказался на границе возможного пробоя, и какая при этом будет напряжённость "электрического поля вблизи внешней границы шаровой молнии" (по терминологии [3]). Для пробоя этого воздушного промежутка необходимо напряжение (без специфики, данной в [5–7], которая многократно увеличит это напряжение) в $5 \text{ кВ см}^{-1} \times 150 \text{ см} = 750 \text{ кВ}$. Необходимая величина средней пробивной напряжённости, именно 5 кВ см^{-1} , выбрана для возможности сохранения относительной дискуссии с оппонентом, так как поле на поверхности шаровой молнии в этом случае будет минимальным и не совпадёт со "стократным превышением", даваемым оппонентом, вследствие чего дальнейшая дискуссия стала бы бессмысленной. Отсюда поле "вблизи границы"

Г.Д. Шабанов. Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра
"Курчатовский институт",
мкр. Орлова роща 1, 188300 Гатчина, Ленинградская обл.,
Российская Федерация
E-mail: shabanov_gd@pnpi.nrcki.ru

Статья поступила 17 декабря 2019 г.

составит 150 кВ см^{-1} , что только в 5 раз больше "величины, соответствующей пробоем" (по терминологии [3]). Оппонент оперирует относительными величинами, поэтому уже при возможном поле на поверхности, для данного примера, в 150 кВ см^{-1} , у средней шаровой молнии будет величина не со "стократным превышением", что ужасно, а всего с 20-кратным превышением поля на поверхности шарика, что вроде бы и не так уж страшно.

Уже во введении работы [5] многократно рассмотрены физические механизмы существования тел с электрическим полем на поверхности выше якобы пробойного ($E > 30 \text{ кВ см}^{-1}$) по [3]. Рассмотрены несколько видов коронирования при разных физических условиях: изменения видов и диаметров электродов, расстояния и среднего поля между ними, темпа повышения напряжения, полярности и т.д. Последний параграф во введении даёт понятие пробоя, его название: "Что следует считать пробоем". Перейдём к конкретным условиям существования средней шаровой молнии как тела с униполярным зарядом, а для этого нужно рассмотреть и условия её рождения, что выполнено в нашей статье [6]. Эта работа использует основные идеи и экспериментальные данные о возможности существования тел с относительно большим электрическим униполярным зарядом [5, 7], знание механизма нисходящего отрицательного лидера [8], а также исходит из данных, полученных в наших экспериментальных работах. Теоретический анализ приведённых выше источников позволил сформулировать в нашей работе [6] следующее:

"Оценим минимальное время образования средней шаровой молнии исходя из нашей модели образования шаровой молнии из головки лидера линейной молнии. Базелян и Райзер [2] (эта ссылка в настоящей статье под номером [7]), описывая стационарную корону, отмечают, что если потенциал шарика (они рассматривают громоотвод с шариком на конце) растёт достаточно медленно, медленнее чем $3,6 \text{ кВ мкс}^{-1}$, то благодаря стабилизации поля в короне от электрода не отрывается волна ионизации и не происходит начальная стримерная вспышка и т.д. Для подтверждения данного тезиса они приводят эксперимент, когда в промежутке в десятки сантиметров среднее электрическое поле удавалось поднимать до $20\text{--}22 \text{ кВ см}^{-1}$ и пробоя не происходило, тогда как обычно с 5 кВ см^{-1} происходит пробой промежутка. Для расчётов они берут поле в короне $E_{кр} = 30 \text{ кВ см}^{-1}$, постоянное для всей короны. Используем данные о максимальной скорости подъёма потенциала шара без пробоя воздушного промежутка в применении к лидеру линейной молнии, его остановки и рождения шаровой молнии. Средний потенциал, доносимый до земли лидером, около 30 МВ . Исходя из максимальной скорости роста потенциала на образующемся теле шаровой молнии в $3,6 \text{ кВ мкс}^{-1}$ минимальное время, необходимое для образования средней шаровой молнии, составит не менее $8,5 \text{ мс} \approx 0,01 \text{ с}$ ".

С любого заряженного тела заряд имеет привычку "стекать". Одним из возможных (дополнительных) механизмов снижения поля на теле в [5, 7] рассматривают механизм, когда одноимённый объёмный заряд (например, стекающий с тела) вокруг тела наводит на нём заряд противоположного знака, что приводит к снижению поля на теле. Стеkanie заряда, а также, если поле на теле превысит

величину зажигания короны, то это явление имеет название коронирование, которое "...удастся различить только в тёмную ночь..." [5]. Наши эксперименты позволили получить удачный снимок короны в тёмном помещении и в сумерках, где корона видна хуже, в основном она различается как зона, на просвет через которую видны искажённые детали обстановки, находящиеся за шаровой молнией.

Как отмечалось в работе [6], мы можем оценить заряд нашего объекта: "Оценим заряд лабораторной шаровой молнии (рис. 1), диаметром 13 см и с короной толщиной около 2 см , по критерию максимального поля в короне ($E_{кр} = 30 \text{ кВ см}^{-1}$). Величина заряда для шаровой молнии, приведённой на рис. 1, и в соответствии с этим критерием, составит около $2 \times 10^{-6} \text{ Кл}$ ". Здесь и далее величины зарядов приведены по абсолютной величине.

В [4] приведены данные по заряду наших объектов, как инструментально измеренные, так и оценённые по диаметру короны (см. выше), а также по энергии, выделяемой при плавлении никромовой проволоки. Величина заряда зависит от времени, когда происходит измерение или оценка заряда, и для конкретного случая составляет около $2 \times 10^{-6} \text{ Кл}$, что соответствует кажущемуся полю на теле шаровой молнии в 43 кВ см^{-1} , что почти в 1,5 раза выше поля "пробоя" по [3].

Радиус коронирования "средней шаровой молнии" [4, 9] чуть больше метра и ей "дотянуться" до пробоя, например, с землёй, при описанных выше условиях (в лабораторной работе) не удастся.

Развёрнутый ответ на комментарий М.Л. Шматова (практически вчетверо большего объёма) будет размещён мною в ближайшее время на: https://www.researchgate.net/profile/Gennady_Shabanov2/research.

Автор признателен А.А. Кудрявцеву, В.Л. Бычкову и А.Г. Кривичу за полезные замечания, высказанные при подготовке моего ответа на комментарий М.Л. Шматова.

Список литературы

1. Саранин В А *УФН* **169** 453 (1999); Saranin V A *Phys. Usp.* **42** 385 (1999)
2. Саранин В А, Майер В В *УФН* **180** 1109 (2010); Saranin V A, Maier V V *Phys. Usp.* **53** 1067 (2010)
3. Шматов М Л *УФН* **190** 107 (2020); Shmatov M L *Phys. Usp.* **63** (1) (2020) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.05.038621>
4. Шабанов Г Д *УФН* **189** 95 (2019); Shabanov G D *Phys. Usp.* **62** 92 (2019)
5. Базелян Э М, Райзер Ю П *Искровой разряд* (М.: Изд-во МФТИ, 1997); Пер. на англ. яз.: Bazelyan E M, Raizer Yu P *Spark Discharge* (Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1998)
6. Shabanov G D et al., in *Proc. of the 11th Intern. Symp. on Ball Lightning, ISBL-10, Kaliningrad, Russia, June 21–27, 2010* (Eds V L Bychkov, A I Nikitin) p. 160
7. Bazelyan E M, Raizer Yu P *Lightning Physics and Lightning Protection* (Bristol: Institute of Physics Publ., 2000); Пер. на русск. яз.: Базелян Э М, Райзер Ю П *Физика молнии и молниезащиты* (М.: Физматлит, 2001)
8. Базелян Э М, Райзер Ю П *УФН* **170** 753 (2000); Bazelyan E M, Raizer Yu P *Phys. Usp.* **43** 701 (2000)
9. Смирнов Б М *УФН* **160** (4) 1 (1990); Smirnov B M *Sov. Phys. Usp.* **33** 261 (1990)

On relation between theoretical and experimental components in the papers on ball lightning

(reply to M.L. Shmatov's comments [*Usp. Fiz. Nauk* **190** 107 (2020)] on the 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)])

G.D. Shabanov. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center 'Kurchatov Institute', mkr. Orlova roshcha 1, 188300 Gatchina, Leningrad region, Russian Federation. E-mail: shabanov_gd@npni.nrcki.ru

M.L. Shmatov highly estimates in his letter [*Usp. Fiz. Nauk* **190** 107 (2020)] the experimental part of G.D. Shabanov's paper [*Phys. Usp.* **62** 92 (2019); *Usp. Fiz. Nauk* **189** 95 (2019)] but presents some critical remarks of the theoretical character. It is shown in this reply that these remarks are based on the misunderstanding related to the excessively unambiguous treatment of elementary physical laws neglecting the possible variety of their manifestations under particular conditions.

Keywords: Gatchina discharge, long-lived luminous formations, macroscopic charge separation, charged bodies, average breakdown electric field strength, ball lightning

PACS numbers: 01.50.My, **01.55. + b**, **05.65. + b**, 41.20.Cv, **51.50. + v**, 52.80.Mg, 92.60.Pw

Bibliography — 9 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **190** (1) 110–111 (2020)
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.12.038705>

Received 17 December 2019
Physics – Uspekhi **63** (1) (2020)
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.12.038705>