

УДК 537.523
EDN: SSAJMG

PACS: 52.80.-s, 92.60 Pw.



Светящееся образование с твердой оболочкой и газообразным ядром

В. Л. Бычков, Д. Е. Сороковых, Д. В. Бычков

Работа посвящена светящимся образованиям (СО), появляющимся в природе в различных условиях, таких как извержение вулканов, удары линейной молнии в почву и при геотектонических событиях, при воздействии горячих газов для создания полых сфер, а также в капиллярных разрядах при ударе струи плазмы в обрабатываемый образец. Экспериментально получены долгоживущие светящиеся образования с временем жизни более 2 с и размером до 2 см. Построенная теория объясняет возможность образования светящихся объектов в электрических приборах при высоких перенапряжениях в электрической цепи и при взаимодействии линейной молнии с линией электропередачи. Согласно ей, светящееся образование представляет собой заряженную сферу с оболочкой из атомов состава почвы или металлов с внутренним объёмом, заполненным газообразным или парообразным веществом. Такие оболочки могут образоваться в электрических приборах и при ударе молниевых разрядов в землю, содержащую SiO_2 и Al_2O_3 и металлические предметы произвольного состава. Рассчитана внутренняя энергия горячего шарообразного объекта при передаче ему заряда от линейной молнии. Обсуждается возможность существования этого объекта с высокой плотностью энергии вплоть до 10^{10} Дж/м³.

Ключевые слова: геотектонические события, удар линейной молнии в почву, высокая плотность энергии, полые сферы, капиллярный разряд, долгоживущее светящееся образование.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-3-223-232

Светящиеся сферические объекты в природе известны давно [1, 2], они появляются в различных условиях, таких как извержение вулканов, удары линейной молнии в почву, различные виды огней [3, 4], при геотектони-

ческих событиях и сложных атмосферных условиях. В [2] были обнаружены гладкие стеклянные предметы в пепле от взрывчатых вулканических извержений. Хрустальные сферы заметила Genareau K. [2] во время исследований извержения вулкана Редаут на Аляске при помощи мощного микроскопа. Также были обнаружены шарики в пепле, оставшемся после извержения исландского вулкана Эйяфьятлайокудль в 2010 году. При этом диаметр сфер составлял 50 микронов. В вулканическом дыме за счет трения частичек пепла друг от друга образуется разряд. Именно он и создает стеклянные шары из частиц стекла, кусков горной породы и минералов. Разряд внутри облака пепла может нагревать воздух за несколько миллионных долей

Бычков Владимир Львович, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: bychvl@gmail.com

Сороковых Дмитрий Евгеньевич, студент.

Бычков Дмитрий Владимирович, студент.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 20.06.2024

После доработки 3.06.2024

Принята к публикации 7.06.2024

Шифр научной специальности: 1.3.4

© Бычков В. Л., Сороковых Д. Е., Бычков Д. В., 2024

секунды, расплавляя частицы. Расплавленные капли во время падения трансформируются в шарики. Вулканические извержения могут производить стекло, однако последние изыскания показали, что только вулканический разряд может формировать хрустальные шарики. Согласно наблюдениям, это шары с размерами от микронов до 50 см, имеют время жизни до нескольких десятков секунд. К свойствам, выделяющим их из природных объектов, является высокая энергия и способность гибнуть со взрывом.

Укажем также сферические объекты, так называемые, полые и наполненные газом сферы и микросферы, получающиеся в практике и технологии в «горячих» условиях. В литературе выделяют несколько групп полых микросфер, отличающихся способом получения и количеством входящих в состав компонентов. Например, полимерные, алюмосиликатные (керамические, зольные), стеклянные, силикатные и углеродные [5]. Стеклянные микросферы производятся как отходы на электростанциях, работающих на угле. В этом случае продукт обычно имеет алюмосиликатный химический состав. Небольшое количество кремнезема в угле плавится, и по мере того, как микрообъекты поднимаются вверх по дымовой трубе, расширяются и образуют небольшие полые сферы.

Существуют сферические объекты, так называемые, полые и наполненные газом сферы и микросферы, получающиеся в практике и технологии в «горячих» условиях. В литературе выделяют несколько групп полых микросфер, отличающихся способом получения и количеством входящих в состав компонентов. Например, полимерные, алюмосиликатные (керамические, зольные), стеклянные, силикатные и углеродные [5]. Стеклянные микросферы производятся как отходы на электростанциях, работающих на угле. В этом случае продукт обычно имеет алюмосиликатный химический состав. Небольшое количество кремнезема в угле плавится, и по мере того, как микрообъекты поднимаются вверх по дымовой трубе, расширяются и образуют небольшие полые сферы.

Известны работы по физико-химическому получению зольных микросфер с использованием низкотемпературной плазмы [6], что

имеет отношение к данной работе, в которой мы рассматриваем получение сфер в плазме. Установлено, что процесс прогрева в условиях плазмы происходит значительно эффективнее, чем в естественных условиях. В обзорной работе [7] по получению металлических пузырей, рассмотрены различные способы их получения и использования, в том числе в плазме [8], что также имеет отношение к данной работе. В этом случае металл находится в газообразном состоянии, и из газообразного состояния в считанные секунды переводится в твердое состояние с выделением большого количества тепла и повышением давления.

Во второй половине XX-го века при исследованиях плазменных разрядов различных типов были получены долгоживущие светящиеся образования, так, в [9] сообщалось, что большие светящиеся шары появлялись при замыкании электродов аккумуляторных батарей на подводных лодках. В [10] светящиеся шары появлялись при замыкании металлических электродов в жидкости, и при их остывании были обнаружены металлические сферы. В экспериментах со взрывом разряда в воде в кювете с титановыми [11] электродами образовывались полые металлические сферы. При исследовании возможности использования эрозионных разрядов для модификации поверхности материалов было проведено большое количество экспериментов с воздействием плазмы на электроды и материалы, когда в ходе экспериментов в разрядном объеме появлялись светящиеся образования [12, 13].

В этом случае важную роль играли материалы электродов и вещества, с которыми взаимодействовала плазма. Так в экспериментах [14] при создании плазмы в трубках из органических материалов наблюдалось появление полых металлических сфер на основе металла электродов, они вылетали через специальное отверстие в трубке. Также в [15] при наполнении разрядной трубки кремневой ватой при разряде из отверстия в трубке появлялись светящиеся образования со сложной структурой и оболочкой из материала ваты. В экспериментах нашей группы [16, 17] использованы капиллярные разряды, с целью воздействия на металлы и углеродные материалы для создания у них новых потребительских свойств. В них кроме изменения свойств

поверхности материалов были получены долгоживущие светящиеся объекты.

В то время, как многие свойства СО понятны на основе существующих моделей [13, 18], ряд свойств требует дополнительного изучения. В данной работе мы на основе наших экспериментов сформулировали модель, в которой СО представляет собой заряженную сферу с оболочкой из атомов состава почвы или металлов, с внутренним объёмом, заполненным газообразным или парообразным веществом. Такие оболочки могут быть образованы в электрических приборах при высоких перенапряжениях в высоковольтной цепи, а также при ударе молниевых разрядов в землю, содержащую SiO_2 и Al_2O_3 и металлические предметы; они реализуются в экспериментах с капиллярными разрядами, когда высокотемпературная плазменная струя взаимодействует с металлическими образцами, образуя светящиеся сферы с оболочкой и газообразным ядром. Согласно модели, объект имеет оболочку и ядро, и может быть электрически заряженным.

Эксперимент

В продолжение ранее проделанных экспериментов [16,17] были проведены эксперименты по созданию искусственных долгоживущих СО при взаимодействии струи генератора капиллярной плазмы с металлическими образцами в различных условиях. Максимальный ток составлял 72 А, время импульса – 15–25 мс. Схема капиллярного плазменного генератора приведена в [17].

При вводимых энергиях 0,2–1,5 кДж плазменная струя взаимодействовала с металлом, в результате чего формировался светящийся объект или объекты с внутренней паровой областью и оксидной оболочкой. Использовались металлические образцы, изготовленные из алюминия, меди, стали, свинца и припоя. Появление оксидной оболочки регистрировалось при попадании объектов в кювету с водой. Наилучшие результаты были получены при использовании алюминия, свинца и припоя, при использовании которых наблюдалось образование оболочки шириной от 20 до 100 микрон. При подводимой энергии около 15000 Дж наблюдалось образование СО

диаметром до 1,0–1,5 см, с толщиной оболочки до 100 мкм и временем жизни до 7 с. Эти СО иногда взрывались и оставляли следы в виде точек сажи при взаимодействии с бумагой и следов взрыва на бумаге. По параметрам: длительное свечение (длительный срок службы), способность к прыжку, распад на несколько объектов, высокая плотность внутренней энергии, они являются аналогами настоящей шаровой молнии. На рисунке 1 представлено появление СО из плазмотрона.



Рис. 1. СО в эксперименте. Диаметр объекта на 45-м кадре составляет около 0,7 см (частота съемки составляет 238 кадров в секунду)

Некоторые из светящихся объектов взрывались в воздухе. На видео была заметна разрушающаяся оболочка. По видео можно определить время жизни от рождения до разрушения СО, в частности оно составляет в данном эксперименте 2,8 секунды. Во всех проведенных экспериментах движение СО можно описать следующим образом. Когда они соприкасаются с какой-либо поверхностью, они подпрыгивают на определенную высоту примерно в несколько сантиметров. Затем снова падают и снова подпрыгивают. Это движение наблюдалось на протяжении всей их жизни, при этом амплитуда каждого последующего прыжка уменьшалась, а длина увеличивалась. Некоторые из этих СО взрывались при падении на поверхность стола или бумаги, разбиваясь на более мелкие СО.

Модель СО

При ударе разряда (в том числе молниевом) который переносит большую энергию в некоторый объект, часть её расходуется на испарение вещества, образуется паровое ядро

и оболочка из окисленного материала (при ударе молнии может также происходить перенос электрических зарядов одного знака). То есть образуется заряженный объект, состоящий из оболочки и ядра. Для простоты анализа мы предполагаем, что энергии разряда (в том числе молниевое) достаточно, для создания атомов идеального газа. Энергия такого объекта складывается из термической и электростатической энергий, переданных от разряда.

Энергия объекта

Часть энергии СО, возникающего при нагревании материала при ударе разряда (в том числе молниевое) связана с его параметрами выражением, следующим из уравнения Клайперона-Менделеева [19]

$$E_{term} = \frac{m \bar{R} T}{\mu}, \quad (1)$$

где $\bar{R} = 8,3 \times 10^3$ Дж/(Кмоль·К) – газовая постоянная.

В модели для простоты мы рассматриваем униполярно заряженный шар, для электрической энергии которого [13, 18] известна формула:

$$E_{el} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{(R + \delta)} \quad (2)$$

где Q – заряд СО; R – радиус шара без учета оболочки; δ – толщина оболочки, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

При этом внутренняя энергия СО за счет обоих механизмов возбуждения равна

$$E_{\Sigma} = E_{el} + E_{term} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{(R + \delta)} + \frac{m \bar{R} T}{\mu}, \quad (3)$$

а плотность энергии при $R \gg \delta$ равна,

$$W_{\Sigma} = W_{el} + W_{term} \approx \frac{3}{(4\pi)^2 \epsilon_0} \frac{Q^2}{R^4} + \frac{m \bar{R} T \times 3}{\mu 4\pi R^3} \quad (4)$$

где m – масса материала СО (вещество атомов); \bar{R} – универсальная газовая постоянная; T – температура материала СО; μ – молекулярный вес диссоциированных молекул. В (4) пренебрегается δ по сравнению с R . Для оценок в этом случае рассматривается кремний, содержание которого в земной коре достигает 50 %. В частности, в модели мы считаем, что происходит диссоциация SiO_2 ($\mu_{\text{Si}+\text{O}_2} = 28,09+32$), а молекулярный вес полученных частиц $\mu_p \approx 30$. Остается под вопросом влияние температуры оболочки на давление внутри СО. Вопрос о горячей оболочке в известной авторам литературе не исследован [20, 21].

В проделанных экспериментах появляется сфера с четко отличающимся ядром и оболочкой как составом, так и внешним видом. Существование оболочки определяется неравновесными процессами, имеющими место при ударе разряда в материал, когда неравновесные процессы образования оболочки приводят к изменению его физических и химических свойств. (В природных процессах пар состоит из частиц Si и O_2 , а оболочка – из модифицированного расплава SiO_2 и его сплава с компонентами материала, а в случае взаимодействия молнии с металлами типа стали, олова, алюминия, припоая пар состоит из атомарных частиц соответствующего металла.) Для оценок будем считать, что температура газа внутри оболочки близка к 2000 К и равна типичной температуре кипения SiO_2 .

Исследования по гибким оболочкам [20, 21] показывают, что до момента потери устойчивости во всех нормальных сечениях оболочки имеют место сжимающие напряжения σ , величина которых равна:

$$\sigma = \frac{P_a \times R}{2\delta}, \quad (5)$$

где δ – толщина оболочки; R – радиус сферы; $P_a = 1,03 \times 10^5$ Па – атмосферное давление.

Известно [13, 18] выражение для кулоновского действия зарядов одного знака на поверхность шара

$$F_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{(R + \delta)^2}, \quad (6)$$

где Q – заряд шара. Из него следует выражение для кулоновского давления зарядов одного знака, действующих на оболочку

$$P_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{\pi(R+\delta)^2 R^2} \approx \frac{Q^2}{4\pi^2\epsilon_0 R^4}. \quad (7)$$

Авторы считают, что именно процессы атомизации вещества, кулоновского расталкивания и механического сжатия оболочки приводят к установлению давления внутри шара.

Сила давления частиц типа SiO_2 внутри шара равна

$$P_w = \frac{m}{\mu} \bar{R}T \left(\frac{4}{3} \pi (R+\delta)^3 \right)^{-1} \approx \frac{m}{\mu} \bar{R}T \times \frac{3}{4\pi R^3}, \quad (8)$$

а напряжение на оболочке

$$\sigma = \frac{m}{\mu} \bar{R}T \frac{3}{4\pi R^3} R / (2\delta) = \frac{m}{\mu} \bar{R}T \frac{3}{8\delta\pi(R)^2}. \quad (9)$$

Из этих выражений следует уравнение для определения баланса действующих сил на поверхность СО (где $\bar{R} = 8,3 \times 10^{-3}$ Дж/(Кмоль·К) –

газовая постоянная, T – температура частиц газа внутри СО).

В таблице 1 представлены параметры заряженного шара в зависимости от величины заряда для размера шара $R = 0,1$ м и $R = 0,2$ м.

Из таблицы видно, что плотность энергии заряженного СО растет с величиной, обладаемого им заряда при этом давление заряда на оболочку растет. Уже при $Q > 10^{-4}$ Кл давление зарядов на оболочку сравнивается с атмосферным. При этом возможен взрыв при случайном нарушении оболочки. В таблице 2 представлена внутренняя энергия СО в зависимости от его веса при температуре пара $T = 2000$ К, при толщине оболочки $\delta = 100$ мкм и при среднем атомном весе $\mu = 30$ (как для диссоциированного SiO_2), при размере СО $R = 0,1$ м и $R = 0,2$ м. Мы также приводим величину напряжения на оболочке (9). Из таблицы 2 видно, что термическая энергия увеличивается с ростом веса СО, при этом растет механическое напряжение на поверхности СО. При массе СО порядка 10^{-5} кг, напряжение на оболочке превосходит давление атмосферы и СО может разрушиться при случайной флуктуации параметров СО.

Таблица 1

Параметры заряженного шара

R , м	Q , Кл	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
0,1	P_{el} , Па	28,6	$2,86 \times 10^3$	$2,86 \times 10^5$	$2,86 \times 10^7$	$2,86 \times 10^9$	$2,86 \times 10^{11}$
0,1	W_{el} , Дж/м ³	21,5	$2,15 \times 10^3$	$2,15 \times 10^5$	$2,15 \times 10^7$	$2,15 \times 10^9$	$2,15 \times 10^{11}$
0,2	P_{el} , Па	1,79	$1,79 \times 10^2$	$1,79 \times 10^4$	$1,79 \times 10^6$	$1,79 \times 10^8$	$1,79 \times 10^{10}$
0,2	W_{el} , Дж/м ³	1,34	$1,34 \times 10^2$	$1,34 \times 10^4$	$1,34 \times 10^6$	$1,34 \times 10^8$	$1,34 \times 10^{10}$

Таблица 2

Внутренняя энергия СО в зависимости от веса СО при $\delta = 100$ мкм, $T = 2000$ К, $\mu = 30$

R , м	M , кг	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10
0,1	W_{term} , Дж/м ³	$1,32 \times 10^5$	$1,32 \times 10^6$	$1,32 \times 10^7$	$1,32 \times 10^8$	$1,32 \times 10^9$
0,1	P_w , Па	$1,32 \times 10^5$	$1,32 \times 10^6$	$1,32 \times 10^7$	$1,32 \times 10^8$	$1,32 \times 10^9$
0,1	σ , Па	$6,6 \times 10^7$	$6,6 \times 10^8$	$6,6 \times 10^9$	$6,6 \times 10^{10}$	$6,6 \times 10^{11}$
0,2	W_{term} , Дж/м ³	$1,65 \times 10^4$	$1,65 \times 10^5$	$1,65 \times 10^6$	$1,65 \times 10^7$	$1,65 \times 10^8$
0,2	P_w , Па	$1,65 \times 10^4$	$1,65 \times 10^5$	$1,65 \times 10^6$	$1,65 \times 10^7$	$1,65 \times 10^8$
0,2	σ , Па	$1,65 \times 10^7$	$1,65 \times 10^8$	$1,65 \times 10^9$	$1,65 \times 10^{10}$	$1,65 \times 10^{11}$

* При $m = 5,15 \times 10^{-3}$ кг вес СО сравнивается с весом окружающего воздуха.

Поскольку как величина заряда СО, так и величина массы вещества, могут влиять на условия существования, то действие этих факторов будут складываться. При этом суммарная плотность энергии может изменяться в широких пределах и достигать величины 10^9 – 10^{10} Дж/м³, что находится в согласии с некоторыми наблюдениями [3, 13]. При $Q > 10^{-3}$ Кл давление зарядов на оболочку и при $m > 10^{-5}$ кг давление и напряжение сравнивается с атмосферным и СО становится неустойчивым. Высокие значения зарядов и масс, при которых наблюдаются аномальные СО ставит вопрос, о реальности таких СО. СО с массой до 10 кг попадают в район плотности энергии 10^8 – 10^9 Дж/м³, который не является аномальным. Высокие значения массы СО порядка 100 кг трудно представить, хотя существуют наблюдения, когда движущееся СО сломало несколько стволов толстых деревьев [3, с. 63]. СО с зарядом 10^{-2} – 10^{-1} Кл попадают в район наблюдений плотности энергии 10^{10} – 10^{11} Дж/м³, однако простые оценки показывают, что напряженность электрических полей на поверхности таких СО лежит в диапазоне 10^8 – 10^{10} В/м, что трудно объяснить, учитывая пробойные напряженности электрического поля в воздухе порядка 3×10^6 В/м.

Электрическое поле сильно заряженной СО

Оценки напряженности электрического поля вблизи заряженных шаров, имеющих параметры наблюдаемой высокоэнергетических СО, поднимают вопрос о том, почему не реализуется разряд на землю. Для ответа на этот вопрос рассмотрим заряженный шар в электрическом поле, созданном большим собственным зарядом шара. Это электрическое поле на поверхности шара велико и способно ионизировать воздух.

Из электростатики известно, что электрическое поле около заряженного шара изменяется в зависимости от расстояния R от него, как

$$E = E_s (r_s / R)^2, \quad (10)$$

где E_s , R -, соответственно – электрическое поле на поверхности сферы и расстояние до

сферы; r_s – радиус сферы. Величина электрического поля E_s связана с электрическим зарядом на сфере Q и радиусом сферы известным соотношением $Q = 4\pi\epsilon_0 \times r_s^2 E_s$ или

$$E = \frac{Q}{4\pi \times \epsilon_0 \times R^2}. \quad (11)$$

В процессе заряжения объекта разрядом может реализоваться ситуация, когда начальное электрическое поле на поверхности объекта больше, чем так называемое поле пробоя. Как известно в пробойном поле скорость ионизационных процессов сравнивается со скоростью гибели электронов. В этом случае поле на сфере связано с полем пробоя E_{br} (в воздухе $E_{br} \approx 2,8 \times 10^6$ В/м [19]) соотношением, следующим из (10)

$$r_{br} = r_s (E_s / E_{br})^{0,5}, \quad (12)$$

где r_{br} – расстояние от центра сферы до границы ионизации. В пространстве вокруг заряженной сферы образуется плазменный слой, который экранирует электрическое поле заряженной сферы.

При высоких значениях напряженности электрического поля в воздухе, как показали расчеты [22–24], образуется плазма, состоящая в основном из ионов NO^+ и электронов; следовательно, концентрацию электронов для оценок можно определить на основе упрощенного уравнения

$$\frac{dn_e}{dt} = q + v_i \times n_e - \alpha_{dr} \times n_e^2, \quad (13)$$

здесь t – время; q – скорость образования электронно-ионных пар в воздухе за счет быстрых фоновых частиц; n_e – концентрация электронов; $v_i = v_i(E/N)$ – частота ионизации молекул воздуха электронами в электрическом поле (ее значение зависит от параметра E/N ; N – концентрация частиц газа) можно найти в [22–24], коэффициент диссоциативной рекомбинации электронов и молекулярных ионов $\alpha_{dr} = 2 \times 10^{-7} (T_g/T_e)^{0,5}$, см³/с; T_g , T_e температуры газа и электронов соответственно. От-

метим, что мы рассматриваем случай высоких значений параметра E/N , когда ролью отрицательных ионов можно пренебречь [18], поэтому член, учитывающий прилипание электронов к молекулам кислорода не приводим.

В условиях квазинейтральной плазмы, концентрации электронов и положительных ионов равны $n_e = N_i$, N_i – концентрация положительных ионов. При этом в слое плазмы $E \geq E_{br}$. Например, как следует из [22], при $E = 4$ МВ/м ($E/N = 150 \times 10^{-15}$ В·см²), типичное время t увеличения концентрации электронов до 10^2 см⁻³ составляет 10^{-9} с и меньше.

Определим, как плазма влияет на электрическое поле в слое $r_s < r < r_{br}$. Согласно [19] потенциал заряженной сферы в плазме определяется выражением

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi \times \epsilon \times R} \times \exp(-R/r_D) \quad (14)$$

где $r_D = (\epsilon_0 \times T_i \times T_e / e^2 n \times (T_e + T_i))^{0.5}$ – радиус дебаевского экранирования в случае двухкомпонентной плазмы; e – заряд электрона; n – концентрация частиц плазмы T_i ; T_e – температуры ионов и электронов соответственно. При $T_e \gg T_i$ что выполняется при сильных электрических полях в плазме, то

$$r_D = (\epsilon_0 \times T_i / e^2 n)^{0.5}. \quad (15)$$

Абсолютная величина электрического поля, определяемая на основании выражения (14), имеет вид

$$E_p = \frac{Q}{4\pi \times \epsilon_0 \times R^2} \times \exp(-R/r_D) (1 + R/r_D). \quad (16)$$

Расчеты [22] показывают, что для полей пробоя $n \approx 10^{16}$ см⁻³, тогда радиус Дебая оказывается $r_D \approx 1,2 \times 10^{-6}$ см. Выражение (16) упрощается и принимает вид

$$E_p = \frac{Q}{4\pi \times \epsilon_0 \times R^2} \times R/r_D \times \exp(-R/r_D) = \frac{Q}{4\pi \times \epsilon_0 \times R^2} \times F, \quad (17)$$

$$\text{где } F = R/r_D \times \exp(-R/r_D) = R \times \left(\frac{e^2 \times n}{\epsilon_0 T_i} \right)^{0.5} / \exp R \times \left(\frac{e^2 \times n}{\epsilon_0 T_i} \right)^{0.5}.$$

Подставляя в F конкретные значения параметров в системе СИ, получаем

$$F = R \times n^{0.5} \times 2,3 \times 10^{13} / \exp(R \times n^{0.5} \times 2,3 \times 10^{13}),$$

где R в [м] и n в [м⁻³]. Эта величина стремится к нулю; поэтому можно считать, что поле плазмы $E_p = 0$ находится в районе $r_s < r < r_{br}$ от радиуса сферы для всех концентраций частиц плазмы. Таким образом, плазменные процессы отключают электрическое поле. Как отмечалось выше [19], плазма при сильных полях появляется при временах 10^{-9} с и меньше, так что электрическое поле экранируется. Следовательно, в этой пространственной области не происходит никаких явлений пробоя. При $r \geq r_{br}$ электрическое поле вновь описывается

$$\text{законом Кулона } E = \frac{Q}{4\pi \times \epsilon_0 \times R^2}.$$

При $r = r_{br}$, $E = E_{br}$ толщина слоя, в котором генерируются электроны и ионы, порядка длины плазменных колебаний – толщины слоя. В этом слое в стационарном случае из (13) следует

$$n_e = \frac{v_i}{2\alpha_{dr}} + \frac{1}{2} \times \sqrt{\left(\frac{v_i}{\alpha_{dr}} \right)^2 + 4 \frac{q}{\alpha_{dr}}}.$$

Конкретное значение концентрации электронов в стационарных условиях при близком к пробое электрическом поле $E = 3,3$ МВ/м оказывается [23] порядка 5×10^{15} см⁻³, когда $Te \sim 3$ эВ, а радиус Дебая равен $1,8 \times 10^{-5}$ см, и этот слой может быть заметен, как ореол над СО в воздухе. То есть наличие сверхсильного электрического поля у сильно заряженного СО не является ограничением для существования СО. Это подтверждают эксперименты с коронными разрядами [25], в которых напряжение на высоковольтном электроде было в несколько раз выше пробойного.

Время жизни СО можно связать с временем его излучения. Оценим параметры излу-

чения. Будем считать, что нагрев оболочки паром компенсируется термическим излучением с поверхности оболочки, тогда, можно воспользоваться следующим приближенным относительно теплоёмкости реального газа выражением [19]:

$$\frac{3}{2} N k_B \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{dT}{dt} = -\sigma_{SB} T^4 4\pi R^2, \quad (18)$$

где k_B – постоянная Больцмана, а σ_{SB} – постоянная Стефана-Больцмана. Решение этого уравнения для определения времени остывания до температуры T_1 , если начальная температура газа много больше конечной температуры газа $T \gg T_1$, имеет вид:

$$t_x = \frac{N k_B R}{6 \sigma_{SB} T_1^3}. \quad (19)$$

При значениях средних параметров СО: $N = 2,7 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $R = 0,1 \text{ м}$, $T_1 = 300 \text{ К}$ (конечная температура СО), получим $t_x \approx 14 \text{ с}$. Эта величина сравнима с наблюдаемым временем жизни СО.

Заключение

Работа, посвящена светящимся образованиям, появляющимся в природе в различных условиях, таких как извержение вулканов, удары линейной молнии в почву и при геотектонических событиях, при воздействии горячих газов для создания полых сфер, а также в капиллярных разрядах при ударе струи плазмы в обрабатываемый образец. При этом многочисленные примеры, появления таких образований сфер с оболочкой как в природе и практике приводит к пониманию возможности их создания в физическом эксперименте.

В работе проделаны эксперименты по получению долгоживущих светящихся образований в экспериментах с эрозионными газовыми разрядами. Были получены светящиеся образования с временем жизни до 3 с и первоначальным размером 1,0–1,5 см. Характер их разрушения (взрыва) указывает на присутствие горячего газа внутри СО. Оболочка представляет собой оксидную пленку. Важным свойством такой оболочки является сжа-

тие ею горячего газа, а электрический заряд на поверхности приводит к растяжению поверхности. Величина отношения радиуса оболочки к ее толщине оказывается большой, что позволяет оболочке выдерживать высокое механическое внутреннее давление, что определяет сферическую форму оболочки. Напомним что, проблема сферичности оболочки всегда стоит перед теориями светящихся образований в виде шаровой молнии [13].

Представлены уравнения внутренней энергии этого объекта за счет давления зарядов и термического расширения горячего газа. Проведены расчеты внутренней энергии этого объекта, давления зарядов на оболочку и напряжения оболочки, вызванного давлением горячего газа внутри оболочки. Расчеты показывают, что внутренняя энергия данного объекта может достигать величины 10^9 – 10^{11} Дж/м^3 , что находится в согласии с наблюдениями. При этом при высоких значениях электрического поля на поверхности, происходит его отключение плазменными процессами, что также подтверждается экспериментами с коронными разрядами [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ikeya M.* Earthquakes and animals. – New Jersey, World Scientific, 2004.
2. *Genareau K., Mukulata G. K., Proussevitch A. A., et al.* / J. Appl. Volcanology. 2013. Vol. 2. № 4.
3. *Ольховатов А.* Тунгусский феномен 1908 года. – М.: Бином, 2008.
4. *Strand E. P.* In Int. Proj. Hessdalen workshop. – Bologna. Proc. Medicina. Italy. 2006. P. 4–11.
5. *Данилин Л. Д., Дорожжин В. С., Киваев М. Д. и др.* / Цемент и его приложения. 2012. № 4. С. 100.
6. *Волокитин Г. Г., Шеховцов В. В., Скрипникова Н. К. и др.* / Вестник ТГАСУ. 2016. № 3. С. 139.
7. *Петров М. А., Бакст Ю. Л., Петров П. А., Шейнак А. А.* / Известия МГТУ МАМИ. 2012. Т. 2. № 2 (14). С. 144.
8. *Bulina N. V., Gromyko A. I., Bondarenko G. V., Marashevsky A. V., Chekanova L. A. et al.* / The physics of metals and metallography. 2006. Vol. 102. Suppl. 1. P. S94–S95.
9. *Silberg P. A.* / J. Geophys. res.: Atmospheres. 1994. Vol. 99. № D5. P. 10679.
10. *Golka R. K. Jr.* / J. Geophys. res.: Atmospheres. 1994. № D5. P. 10679–10681.
11. *Уруцкоев Л. И., Ликсонов В. И., Циноев В. Г.* / Прикладная физика. 2004. № 4. С. 83.
12. *Paiva G. S., Pavão A. C., de Vasconcelos E. A., Mendes O. Jr., da Silva E. F.* / Phys Rev Lett. 2007. Vol. 98. P. 048501-1–048501-4.

13. *Bychkov V. L.* Natural and Artificial Ball Lighting in the Earth's Atmosphere. – Springer Atmospheric Sciences. Switzerland, 2022.
14. *Emelin S. E., Semenov V. S., Bychkov V. L. et al.* / Tech. Phys. 1997. Vol. 42. № 3. P. 269.
15. *Emelin S., Bychkov V., Astafiev A., Kovshik A., Pirozersky A.* / IEEE Trans. on Plasma Science. 2012. Vol. 40. № 12. P. 3162.
16. *Bychkov V. L., Chernikov V. A., Osokin A. A. et al.* / IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. P. 4043.
17. *Байдак В. А., Бычков В. Л., Сороковых Д. Е., Бычков Д. В., Ваулин Д. Н.* / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 5. С. 399.
18. *Nikitin A. I., Bychkov V. L., Nikitina T. F., Velichko A. M., Abakumov V. I.* / IOP Conf. Series: J. of Phys.: Conf. Series. 2018. Vol. 996. P. 012011. doi: 10.1088/1742-6596/996/1/012011.
19. *Смирнов Б. М.* Введение в физику плазмы. – М.: Наука, 1987.
20. *Погорелов В. И.* Строительная механика тонкостенных конструкций. – С.-Петербург: «БХВ Петербург», 2007.
21. *Гегузин Я. Е.* Пузыри. – М.: Наука, 1985.
22. *Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kochetov I. V., Kosmachevskii K. V.* in *The Atmosphere and Ionosphere.* V. Bychkov, G. Golubkov, A. Nikitin, Eds. – Springer, Switzerland. 2014. P. 69.
23. *Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kosmachevskii K. V.* / IEEE Trans. on Plasma Sci. 2017. Vol. 45. P. 3118.
24. *Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Bychkov D. V., Kosmachevskii K. V.* Ch. 3. In *Plasma assisted combustion, gasification and pollution control.* V. 1. Ed. Matveev I. B. – Denver, Colorado: Outskirts press, 2013. P. 183.
25. *Akishev Yu. S., Grushin M. E., Kochetov I. V., Napartovich A. P., Trushkin N. I.* / Plasma Phys. 1999. Vol. 25. P. 1.

PACS: 52.80.- s, 92.60 Pw.

A luminous formation with a solid shell and a gaseous core

V. L. Bychkov, D. E. Sorokovykh and D. V. Bychkov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics
Bd. 2, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: bychvl@gmail.com

Received 20.06.2024; revised 3.06.2024; accepted 7.06.2024

The work is devoted to luminous formations that appear in nature in various conditions such as volcanic eruptions, linear lightning strikes into the soil, in aquatic conditions during geotectonic events and other atmospheric conditions. The constructed theory explains the possibility of the formation of luminous objects in electrical devices at high overvoltages in a high-voltage circuit and during the interaction of linear lightning with a power line. Based on previous experiments, a model has been developed in the work, according to which the luminous formation is a charged sphere with a shell of atoms of soil, metals, and/or water, with an internal volume filled with a gaseous or vaporous substance. Such shells can be formed in electrical devices at high overvoltages in a high-voltage circuit, as well as when lightning discharges strike the ground containing SiO_2 and Al_2O_3 and metal objects of arbitrary composition. The internal energy is calculated during the formation of such a hot spherical object and during the transfer of charge from linear lightning. The possibility of the existence of this object with a high energy density up to 10^{10} J/m^3 is discussed.

Keywords: geotectonic events, volcanic eruption, luminous formation, linear lightning strike into the soil, high energy density, capillary discharge, long-lived luminescent formation.

REFERENCES

1. Ikeya M., Earthquakes and animals. World Scientific, New Jersey, 2004.
2. Genareau K., Mukulata G. K., Proussevitch A. A. et al., *J. Appl. Volcanology* **2** (4), (2013).
3. Olkhovатов A., *Tunguska Phenomenon 1908*, Moscow, Binom Publishers, 2008 [in Russian].
4. Strand E. P. in *Int. Proj. Hessdalen workshop. Proc. Medicina. Bologna, Italy, 2006*, pp. 4.
5. Danilin L. D., Dorozhzhin V. S., Kivaev M. D. et al., *Cement and its applications*, № 4, 100 (2012) [in Russian].
6. Volokitin G. G., Shekhovtsov V. V., Skripnikova N. K. et al., *Vestnik TGASU*, № 3, 139 (2016) [in Russian].
7. Petrov M. A., Bakst Y. L., Petrov P. A. and Sheipak A. A., *Izvestiya MGTU MAMI* **2**, № 2 (14), 144 (2012) [in Russian].
8. Bulina N. V., Gromyko A. I., Bondarenko G. V., Marashevsky A. V., Chekanova L. A. et al., *The physics of metals and metallography* **102** (1), S94 (2006).
9. Silberg P. A., *J. Geophys. res.* **67**, 4941 (1962).
10. Golka R. K. Jr., *J. Geophys. res.: Atmospheres*. **99** (D5), 10679–10681 (1994).
11. Urutskoev L. I., Liksonov V. I. and Tsynoev V. G., *Applied Physics*, № 4, 83–100 (2004) [in Russian].
12. Paiva G. S., Pavão A. C., de Vasconcelos E. A., Mendes O. Jr. and da Silva E. F., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 048501-1–048501-4 (2007).
13. Bychkov V. L., *Natural and Artificial Ball Lightning in the Earth's Atmosphere*, Springer Atmospheric Sciences, Switzerland, 2022.
14. Emelin S. E., Semenov V. S., Bychkov V. L. et al., *Tech. Phys.* **42** (3), 269–277 (1997).
15. Emelin S., Bychkov V., Astafiev A., Kovshik A. and Pirozersky A., *IEEE Trans. Plasma Science* **40**, 3162 (2012).
16. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Osokin A. A. et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43**, 4043 (2015).
17. Baidak V. A., Bychkov V. L., Sorokovykh D. E., Bychkov D. V. and Vaulin L. N., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **11** (5), 399 (2023) [in Russian].
18. Nikitin A. I., Bychkov V. L., Nikitina T. F., Velichko A. M. and Abakumov V. I., *IOP Conf. Series: J. of Phys.: Conf. Series* **996**, 012011 (2018). doi: 10.1088/1742-6596/996/1/012011.
19. Smirnov B. M., *Introduction to plasma physics*, Moscow, Nauka, 1987 [in Russian].
20. Pogorelov V. I., *Construction mechanics of thin-walled structures*, St. Petersburg, "BHV Petersburg", 2007 [in Russian].
21. Geguzin Y. E., *Bubbles*, Moscow, Nauka, 1985 [in Russian].
22. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kochetov I. V. and Kosmachevskii K. V. in *The Atmosphere and Ionosphere*. V. Bychkov, G. Golubkov, A. Nikitin, Eds. Springer, Switzerland, 2014, pp. 69.
23. Ardelyan N. V., Bychkov V. L. and Kosmachevskii K. V., *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **45**, 3118 (2017).
24. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Bychkov D. V. and Kosmachevskii K. V., Ch. 3. In *Plasma assisted combustion, gasification and pollution control*. V. I. Ed. I. B. Matveev, Denver, Colorado: Outskirts press, 2013, pp. 183.
25. Akishev Yu. S., Grushin M. E., Kochetov I. V., Napartovich A. P. and Trushkin N. I., *Plasma Phys.* **25**, 1 (1999).