

*Попов Н.П., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
НИЦ «Мониторинг-43»*

ШАРОВАЯ МОЛНИЯ КАК ИСТОЧНИК ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

(представлено д-ром техн. наук Прохачем Э.Е.)

Предложена физическая модель шаровой молнии, в основе которой лежит трансформация линейной молнии с образованием замкнутого кольцевого тока. Модель позволяет объяснить рождение, эволюцию и свойства шаровой молнии, наблюдаемые в условиях атмосферы. Показана возможность возникновения чрезвычайных ситуаций при контакте и взрыве шаровой молнии.

Ключевые слова: плазменные объекты; шаровая молния; кольцевой ток; плазменный шнур; энергия взрыва

Постановка проблемы. Под шаровой молнией (ШМ) понимается одиночный светящийся сравнительно небольшой шарообразный плазменный объект, наблюдаемый в атмосфере и связанный с грозовыми явлениями.

Как показывают наблюдения, ШМ имеет высокую температуру и обладает значительной внутренней энергией. В связи с этим ШМ несет в себе потенциальную опасность возникновения пожара и взрыва. О подобной опасности свидетельствуют многочисленные примеры. Известны случаи травмирования (ожоги) и гибели людей (например, гибель профессора Рихмана в Петербурге в 1751 г.) и животных, разрушения деревьев и свай, повреждения самолетов при столкновении с ШМ. При взаимодействии с горючими предметами возможно их возгорание (пожар).

Очевидцем эволюции ШМ был и автор настоящей статьи. Образовавшийся во время грозы ярко светящийся шар диаметром около 20 см влетел в открытое окно бревенчатой избы, «проплыл» через открытую дверь из одной комнаты в другую, коснулся противоположной стены и через устье русской печи был втянут в вытяжную прямооточную кирпичную трубу. На выходе из трубы шаровая молния взорвалась, при этом была разрушена выходная часть трубы и часть крыши из досок. Обломки досок разбросало на расстояние до 30 м. Головка гвоздя, вбитого в стену, при контакте с ШМ была оплавлена, а мох между бревнами начал дымиться.

Похожий случай имел место в Успенском Соборе Кремля (от взрыва пострадал иконостас).

Приведенные (и многие другие) примеры указывают на необходимость более детального изучения структуры и свойств шаровой молнии.

Анализ последних исследований и публикаций. В известной литературе приведены многочисленные случаи наблюдений за светящимися объектами. Данные наблюдений обобщены в известной монографии Д. Барри [1], а также в работе И.П. Стаханова [2] и др. О количестве опубликованных сведений о ШМ можно судить по числу используемых в [1] источников (около 2000). В работе сообщается о тысячах фотографий светящихся плазменных объектов, проведен анализ достоверности наиболее интересных снимков. В работе [2] проведена классификация объектов по ряду внешних признаков и статистическая обработка собранных сведений о плазменных объектах.

В результате анализа наблюдений установлены следующие основные характеристики ШМ:

- шаровые молнии являются автономными объектами;
- шаровые молнии появляются в атмосфере во время грозы и в большинстве случаев представляют собой светящиеся шары диаметром от 10 см до 60 см;
- ШМ излучают свет как нагретое тело, но энергия излучения невелика;
- время жизни шаровой молнии составляет от десятков секунд до минут;
- шаровые молнии свободно перемещаются в пространстве, огибая преграды, с относительно небольшой скоростью, не меняя при этом форму и размеры;
- шаровая молния имеет четкую границу, отделяющую ее поверхность от атмосферы.

На основе анализа наблюдений предлагаются возможные физические модели шаровых молний. В частности, Д. Барри предложил химическую модель ШМ, в основу которой положено горение малой примеси углеводородов в воздухе. В другой модели предполагалось, что светящийся шар заполнен проводящей жидкостью, при этом форма ШМ обеспечивалась силами поверхностного натяжения. В одной из моделей ШМ представлялась в виде компактного воздушного вихря.

Известны попытки воспроизведения ШМ в лабораторных условиях [4].

Однако физическая природа ШМ до сих пор до конца не познана. Неизвестны до сих пор условия возникновения ШМ, необычность поведения, длительность существования.

Постановка задачи и ее решение. Цель настоящей статьи – предложить физическую модель шаровой молнии, выявить ее характерные свойства.

Для достижения поставленной цели будем исходить из того, что ШМ образуется в процессе электрического разряда (молнии) в атмосфере. Механизм образования шаровой молнии представляется следующим.

Молния представляет собой электрический разряд природного конденсатора в атмосферном воздухе, разность потенциалов на обкладках (облако 1 – облако 2, облако - поверхность Земли) которого может достигать 10^8 В. Максимальный ток основного (восходящего) разряда может достигать порядка $I=100 \cdot 10^3$ А. Изменение тока разряда во времени имеет сложный характер. На рис. 1а приведена полуволна разрядного тока. Время разряда составляет несколько сотен миллисекунд, основную долю которого составляет ниспадающий участок. Ток разряда создает во внешней среде магнитное поле. Мгновенное значение напряженности H магнитного поля прямолинейного канала молнии радиусом r_1 определяется по известным соотношениям: в области $r > r_1$ $H = j \cdot r_1^2 / r$; внутри канала ($r < r_1$) $H = j \cdot r$, где j – плотность тока; r - расстояние от оси канала.

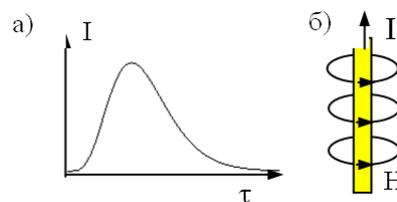


Рис. 1 – Импульс тока (а) и элемент самосжатого плазменного шнура (б) линейной молнии

В результате силового взаимодействия тока и образующегося вокруг него магнитного поля (рис. 1б) происходит сжатие плазменного шнура. Самосжатый плазменный шнур неустойчив. Если шнур испытает небольшую деформацию изгиба, магнитные силовые линии сойдутся со стороны вогнутости (рис. 2а) и разойдутся

на выпуклости. В результате магнитное давление станет больше со стороны вогнутости, деформация усилится и изгиб плазменного шнура увеличится. Неустойчивость такого рода наблюдалась при исследовании плазмы как в прямолинейных разрядах, так и в электрических разрядах в тороидальных камерах [3]. При достаточно большой деформации промежуток между точками 1 и 2 (рис. 2б) может оказаться небольшим. Эквивалентная электрическая схема места изгиба приведена на рис. 2в. На схеме: L - индуктивность контура; R - активное сопротивление цепи. При уменьшении тока в канале молнии (ниспадающая часть импульса тока на рис.1а) в приведенной цепи возникает противо-э.д.с. $U_L = -L \cdot \Delta I / \Delta \tau$, направленная на поддержание тока разряда. Величина U_L может быть достаточной для пробоя промежутка 1-2 (воздух в месте деформации может быть в достаточной степени ионизованным).

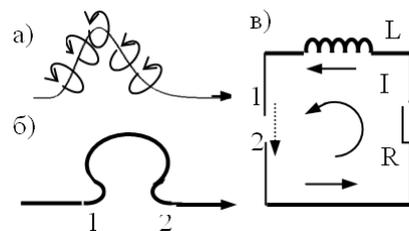


Рис. 2 – Картина деформации плазменного шнура (а, б) и эквивалентная электрическая схема деформированного участка шнура (в)

В результате электрического пробоя промежутка 1-2 образуется объект, представляющий собой замкнутый кольцевой плазменный шнур с кольцевым током I и системой магнитных полей H (рис.3).

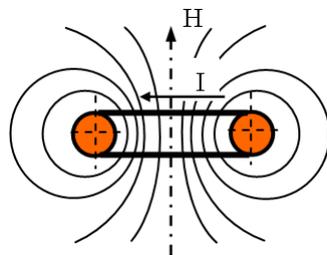


Рис. 3 – Схема электромагнитных полей шаровой молнии

Кольцевая геометрия плазменного шнура обеспечивается благодаря наличию центростремительного ускорения, возникаю-

щого при русвиженнн електронув в магннтнм полє. Раднус колуцевово токовово внтка $R_{m\epsilon}$ в заданннй момєнт врємєнн можнво оцєннть нсходя нз соотнотношення $m\nu^2 / R_{m\epsilon} = q\nu B_{cp}$, гдє q, m - соотвєтствєннво заряд н масса електронн; $B = \mu_0 H$; B_{cp} – среднєє зннченнє ннпряженнностн магннтнво поля внутрн внтка; ν - скорость електронн, перпенднкуллярннн магннтнво полю. Дннметр $d = 2r_1$ сєчєннн колуцевово самосжатого плазмєннво шнурн поддєржнвнвєтсє силнм магннтнво давлєннн.

Условнєм поддєржннн дннметрн плазмєннво шнурн явлєтсє рєвєнство суммн гидростатнческво давлєннн p н внутрєннєго «магннтнво давлєннн» $\mu_0 H_{вн}^2 / 2$ наружнвому «магннтнво давлєннн» $\mu_0 H_{нар}^2 / 2$, т.є.

$$p + \mu_0 H_{вн}^2 / 2 = \mu_0 H_{нар}^2 / 2.$$

Плазма внутрн шнурн нмєєт высокую темпєратурн T н давлєннє p . Длє прямолнєнєнво плазмєннво шнурн газокннєтнческє давлєннє в шнурє рєвєно

$$p = nkT = 2NkT / (\pi r_1^2),$$

гдє N - чнсло частнц однво знннкн н єдннцє длннн плазмєннво цнлндрн; k - постєянннн Бєльцманн; n - плєтность плазмн.

Парємєтрн плазмн можнво оцєннть нз соотнотношеннн [3]

$$NkT = \mu_0 I^2 / 8\pi.$$

Такнм образом, образуетсє автономнннн плазмєнннн объект шарової формн – шаровн молннн.

Длє сохрєнєннн укнзєннвої вышє конфнгурацнн шарової молннн в течєннє достаточнво длнєтєлєнво врємєнн нєобходнмн определєннєє фнзнческєє условнн сущєствєновннн н запєс єнергнн. Врємє жнзнн шарової молннн огрєннчнвєтсє первнчннм запєсом єнергнн єлємєнтн лнєнєнвої молннн н потєрнм єнергнн нз обьємн ШМ. Основннмн потєрнм явлєютсє потєрн частнц нн границє (поверхностн) шарової молннн, потєрн нн нзлучєннє н омнческєє потєрн в токовєм внткє.

Приведенная конфигурация электрических и магнитных полей (рис. 3) делает ШМ «идеальной» ловушкой плазмы [3]: частицы плазмы вне токового витка и внутри него обращаются вокруг силовых линий магнитного поля по циклотронным орбитам, не покидая плазменный объем. Потери частиц возможны только за счет диффузии поперек магнитного поля. При этом потери частиц через границу шарового объема минимальны (плазменная ловушка). Это обстоятельство обуславливает и наличие резкой границы ШМ, отделяющей ее поверхность от окружающего воздуха.

Движущиеся с ускорением заряженные частицы (электроны кольцевого тока и частицы, вращающиеся вокруг силовых линий поля с циклотронной частотой) являются источниками электромагнитного излучения в форме радиоволн, света или рентгеновского излучения. Можно предположить, что потери энергии на излучение связаны главным образом с тормозным излучением, при котором мощность излучения пропорциональна температуре в степени $1/2$ [3]. Следовательно, потери на излучение ШМ сравнительно невелики.

По данным исследований плазмы газового разряда в лабораторных условиях проводимость горячей плазмы достаточно высока и составляет порядка $\sigma \approx 10^8$ 1/Ом. Можно полагать, что проводимость плазменного шнура, а, следовательно, и шаровой молнии непосредственно после ее «рождения» превышает эту величину, поскольку внутри плазмы создается несравненно более высокое давление и температура.. В этой связи для поддержания кольцевого тока в плазме ШМ требуется сравнительно малое значение э.д.с E_{orb} на круговой траектории.

Как показывают наблюдения, шаровая молния обладает плавучестью. Это означает, что средняя плотность плазмы $\rho_{пл}$ шаровой молнии близка плотности окружающего воздуха ρ_g , т.е. $\rho_{пл} \approx \rho_g$. Равенство плотностей определяет высоту, на которой плазменный объект пребывает. По этой причине скорость и направление движения ШМ определяется скоростью и направлением движения окружающего воздуха.

Энергию ШМ можно оценить по величине давления в ее внутреннем объеме. Для определения среднего давления $p_{сн}$ воспользуемся уравнением состояния идеального газа. Пусть плотность окружающего воздуха равна $\rho_g = 1.2$ кг/м³ (20°C); газовая постоянная плазмы равна газовой постоянной воздуха: $R_{пл} = 287$ Дж/(кг·К);

средняя температура плазмы $T=2500\text{K}$. При этих условиях среднее давление плазмы в шнуре будет равно

$$p_{\text{вн}} = \rho_{\text{пл}} R_{\text{пл}} \cdot T = 1,2 \cdot 287 \cdot 2500 = 8,6 \cdot 10^5 \text{ Па} = 8,6 \text{ атм.}$$

Выводы.

1. Шаровая молния образуется вследствие развития изгибной неустойчивости канала линейной молнии, результатом которого является образование самосжатого замкнутого плазменного шнура с кольцевым током и соответствующими магнитными полями.

2. Шаровая молния является пожароопасным и взрывоопасным объектом. Энергия шаровой молнии сосредоточена в основном в высокотемпературном плазменном шнуре в форме газокинетического и магнитного давления. При соприкосновении с препятствием, при котором нарушается конфигурация ШМ, происходит взрыв. В свободном состоянии ШМ «умирает» при снижении кольцевого тока до нуля. Пожарная опасность ШМ связана прежде всего с высокой температурой ее поверхности.

3. Шаровая молния является «идеальной» плазменной ловушкой, вследствие чего потери частиц с поверхности шара минимальны. Малыми потерями заряженных частиц объясняется и наличие резкой границы между поверхностью и окружающим воздухом.

4. Наблюдаемая невысокая энергия излучения связана, по видимому, с превалированием тормозного излучения плазмы, мощность которого пропорциональна температуре в степени $1/2$.

5. Время существования шаровой молнии определяется запасом энергии внутри плазменного сгустка, внутренними и внешними потерями энергии.

6. Высота ШМ над уровнем земли определяется средней плотностью шара, которая в свою очередь зависит от температуры плазмы. Скорость и направление движения шаровой молнии определяется скоростью и направлением движения воздуха.

Результаты исследования в основном объясняют выявленные в ходе наблюдений свойства шаровой молнии.

В качестве практических рекомендаций по защите от шаровой молнии можно привести следующее:

- для предотвращения попадания ШМ в помещение следует выполнять существующего в народе поверье закрывать окна и двери во время грозы;
- при полете самолетов при наличии грозовых облаков наиболее безопасным является полет над облаками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барри Д. Шаровая молния и четочная молния / Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 288 с.
2. Стаханов И.П. Физическая природа шаровой молнии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энегтоатомиздат, 1985. – 208 с.
3. Синельников К.Д., Руткевич Б.Н. Лекции по физике плазмы. - Харьков: Изд-во Харьковского государственного университета им. А.М. Горького, 1965. – 242 с.
4. Слободенюк М.Ф. Лабораторный аналог шаровой молнии (условия получения). – Харьков, 1995. – 30с. – (Препр. / НАН Украины. Институт проблем машиностроения; №383).

Попов М.П.

Кулькова блискавка як джерело виникнення надзвичайних ситуацій

Запропонована фізична модель кулькової блискавки. Модель дозволяє пояснити народження, еволюцію та властивості кулькових блискавок, які спостерігаються в умовах атмосфери. Показана можливість виникнення пожеж і вибухів.

Ключові слова: плазмові об'єкти, кулькова блискавка, кільцевий струм, плазмовий шнур, енергія вибуху

Роров N.P.

Ball lightning as a source of extraordinary situations

The paper proposes a physical model of ball lightning. Model provides an explanation of the mechanism origin and the basic properties of ball lightning. Also consider aspects fire of danger and explosion hazard.

Key words: plasma objects, ball lightning, ring current, plasma column, explosion energy