

УДК 537.525.92;537.523

ФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР Б. В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, Б. Б. ВОЙЦЕХОВСКИЙ

ПРИРОДА ШАРОВОЙ МОЛНИИ

На протяжении ста пятидесяти лет было выдвинуто множество теорий, однако ни одна из них не объясняет все наблюдаемые свойства шаровой молнии. Для большинства теорий остается необъяснимой большая энергия в шаре, зигзагообразное движение, а также его проникновение сквозь мелкие отверстия в закрытые объемы (¹⁻³).

Прежде чем обсуждать природу шаровой молнии, считаем необходимым напомнить читателю несколько экспериментов.

1) Образование электрического ветра при стекании зарядов с острия. Этот эффект подтверждает, что ионы могут увлечь за собой массу воздуха за счет трения.

2) Эксперимент с каплей подкрашенной жидкости, осторожно опускаемой в воду. Под действием силы тяжести, за счет разности удельных весов, капля опускается, увлекая окружающую жидкость, образуется шаровой вихрь. Наблюдателем такой вихрь воспринимается как кольцо.

Движение капли подкрашенной жидкости в воде проходит в несколько стадий (⁷):

а) на протяжении 0,5—1 сек. формируется видимое кольцо, т. е. шарообразный вихрь, который проходит 5—10 см со скоростью 5—10 см/сек, после чего кольцо внезапно замедляется;

б) кольцо быстро расширяется и зависает в воде;

в) зависшее кольцо разделяется на ряд отдельных сгустков окрашенной жидкости, расположенных вдоль кольца, каждый из которых, в свою очередь, повторяет движение первоначальной капли.

Зависающий вихрь представляет собой в поперечном сечении плоское течение, которое распадается на ряд отдельных шаровых вихрей (ниже этим будет объяснена четочная молния).

Остановившись на упомянутых нами двух явлениях, перейдем к описанию природы шаровой молнии.

В атмосфере могут совершаться процессы, при которых сильно искажается правильность распределения электрических зарядов. Это может происходить в момент грозового разряда, при возникновении смерча или при быстрых перемещениях воздушных масс.

Электрические заряды, распределенные в воздухе, создают объемные силы. Рассмотрим частный случай распределения плотности избыточных зарядов, изображенный на рис. 1. Механически эта система соответствует расположению тяжелой жидкости над легкой. Такая система неустойчива. На границе раздела будут образовываться выпуклости, способствующие проникновению тяжелой жидкости в объем легкой жидкости и наоборот. Такие выпуклости, возникающие под действием сил тяжести, взаимодействуя с пробиваемым объемом, превращаются в шаровые вихри. Динамика масс, ускоряемых под действием объемной электрической силы, ничем не отличается от динамики масс, ускоряемых силой тяжести.

В работе (⁴) показано, что только объем, находящийся в кольце и делающий вихрь видимым, обменивается относительно медленно с окружающей средой, а весь остальной объем шара интенсивно рассеивается вдоль его траектории.

Выше мы рассмотрели движение шара на границе одной ступеньки плотности заряда (плотности жидкости); такая ступенька может повторяться многократно. В этом случае проще рассматривать монотонное изменение плотности заряда. Таким образом, мы приходим к выводу, что при монотонно меняющейся плотности заряда в какой-нибудь из областей начинается выпучивание границы и соответствующий объем воздуха, ускоряясь, превращается в вихрь, проходящий

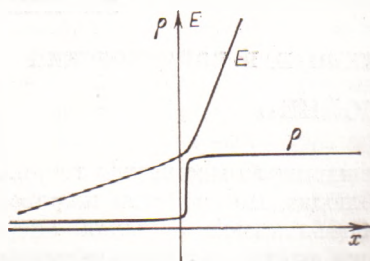


Рис. 1. Частный случай распределения плотности избыточных зарядов в газе, при котором образуется шаровой вихрь. ρ — плотность избыточных зарядов, E — напряженность электрического поля, x — координата

через всю зону монотонного изменения плотности заряда.

За счет усиления напряженности электрического поля в головной части перемещающейся массы происходит ионизация воздуха, возникает тлеющий разряд. Воздух, ионизированный в тлеющем разряде, частично рассеивается вдоль траектории шарового вихря и образует его след. Проводимость следа, в свою очередь, поддерживает тлеющий разряд и большую напряженность поля перед шаром. На переднюю часть шара действует электростатическая сила, приводящая его в движение.

Таким образом, шаровая молния представляет собой явление перемещения объема газа под действием электростатических сил, при этом в ряде случаев образуется шаровой вихрь. Объем неправильной формы может начать светиться еще до возникновения шара. Свечение перемещающегося объема возникает за счет усиления напряженности электрического поля E в головной части перемещающейся массы.

На основании изложенной концепции оценим наблюдаемые свойства шаровой молнии в той последовательности, в которой они изложены в монографии Бранда (2). Скорость перемещения шаровой молнии может быть оценена из следующего выражения:

$$k \frac{\rho u^2}{2} = \frac{E^2}{8\pi} \quad (1)$$

где k — эффективный коэффициент сопротивления вихря; E — напряженность поля перед шаром, максимальное ее значение не превосходит 30 кВ/см; ρ — плотность воздуха; u — скорость шаровой молнии.

Из работы (5) следует, что для вихря,двигающегося с большой скоростью, $k=0,14$, электрическая сила, приложенная к 1 см² поверхности, равна гидравлическому сопротивлению, также отнесенному к 1 см². Принимая $E=30$ кВ/см, из выражения (1) получим $u=20$ м/сек. Значение коэффициента может меняться в зависимости от скорости вихря в широких пределах от $k=0,01$ до 0,17.

В горизонтальном направлении перепад потенциала вследствие проводимости земли значительно меньше, чем в вертикальном направлении. Поэтому из выражения (1) получим, что горизонтальная скорость шаровой молнии значительно меньше вертикальной, что соответствует наблюдениям. В то же время падающая молния движется на большом отрезке пути со скоростью, близкой к предельно возможной (3).

Появление шаровых молний в конце грозы объясняется неоднородностями электрического поля из-за предшествовавших разрядов.

Шаровые молнии возникают тем легче, чем крупнее носители зарядов, т. е. меньше подвижность ионов. Это имеет место в запыленной, дымной атмосфере и зимой. Из работы (6) следует, что во влажной атмосфере можно ожидать значительно меньшую подвижность ионов.

Время жизни шаровой молнии определяется протяженностью области монотонного изменения плотности зарядов, после прохождения этой области шаровая молния исчезает. Если напряженность поля E убывает плавно, то шаровая молния исчезает бесшумно. При внезапном крутом возрастании напряженности электрического поля скорость вихря может подскочить до величины выше критической и начинается искровой пробой впереди и по пройденному каналу, что соответствует взрыву шаровой молнии.

При приближении к проводнику молния попадает под встречный электрический ветер, который ее удерживает при удалении от проводника, но направление ветра не может быть симметричным. Как только шар попадает в теневую зону, он тотчас садится на проводник, это может сопровождаться последующим разрядом по пройденному каналу. Создается впечатление большой энергии, накопленной в шаре. В действительности внутри шара незначительная энергия. А при взрыве шаровой молнии происходит высвобождение потенциальной энергии большего объема окружающего электростатического поля.

Появление окислов азота объясняется химической реакцией в тлеющем разряде. Шипение или жужжание шаровой молнии также объясняется тлеющим разрядом. Этим же объясняются и радиальные полосы, в некоторых случаях тянущиеся к шару.

Иногда наблюдаемая неподвижность шаровой молнии объясняется встречным движением воздуха, приводимым в движение или электрическими силами, или другими причинами, например, конвекционным движением.

Иногда шар превращается в несколько шаров. Этот процесс совершенно аналогичен движению капли окрашенной жидкости на стадиях б) — в).

После разряда линейной молнии в некоторых случаях под действием электрических сил начинается смещение канала перпендикулярно его собственной оси. Образуется плоский вихрь, который распадается на ряд отдельных шаровых вихрей. Таким образом возникает четочная молния.

Отсутствие ощущения тепла наблюдателями (³) шаровой молнии вполне естественно, так как возбуждение свечения происходит не за счет тепла, а за счет тлеющего разряда, т. е. имеет место холодное свечение.

Многими наблюдателями отмечалось проникновение шаровых молний через мелкие отверстия в окнах, а также через проводящие вставки, например, замочные скважины. В действительности в данном случае имеет место исчезновение вихря — шаровой молнии на одной стороне преграды и благодаря монотонному изменению плотности зарядов возникновение независимого нового вихря, запитываемого вначале через проводящий канал, оставшийся от первого вихря.

Таким образом, нами:

1) Предложен механизм образования, движения и исчезновения шаровой молнии, заключающийся в перемещении воздушных масс с образованием опережающих выступов под действием электростатических сил, возникающих за счет неравномерного распределения избыточных зарядов в воздухе, и появлении как следствие этого перемещения шаровых вихрей, разгоняемых электростатическими силами, разряжающих воздух по мере своего движения и запитываемых вдоль траектории, по которой вихрь прошел, частично теряя свою ионизированную массу. Исчезновение шара со взрывом происходит при увеличении напряженности поля выше пробойной, а также при недостаточном количестве электростатической энергии в окружающем пространстве.

2) Изложенная концепция позволяет объяснить явление четочной молнии.

3) Качественно объяснены все характерные особенности шаровой молнии. Оценочный расчет скорости шаровой молнии совпадает с наблюдаемой.

4) Взрыв шаровой молнии, содержащей внутри себя ничтожную энергию, всегда является следствием электрического пробоя при внезапном увеличении напряженности электрического поля в головной части движущегося шара в момент сближения с проводником. При этом происходит выделение электростатической энергии, накопленной в большом окружающем пространстве.

5) Главное отличие шаровой молнии от линейной заключается в том, что в первом случае разряд окружающего пространства осуществляется перемещающимися под действием электростатических сил массами воздуха, а во втором случае — пскровым пробоем.

Сибирское отделение Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
12 III 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. С. Стекольников, Физика молнии и грозозащиты. М.— Л., 1943. ² W. Brand, Der Kugelblitz. Hambrug, 1923. ³ С. Сингер, Природа шаровой молнии, М., 1973.
⁴ А. А. Луговцов, Б. А. Луговцов, В. Ф. Тарасов, В сборн. Динамика сплошной среды в. 3, «Наука», 1969, стр. 50. ⁵ А. А. Бузуков, Журнал прикладной механики и технической физики, № 2, 153 (1971). ⁶ И. П. Стаханов, Письма в ЖЭТФ, т. 18, № 3, 193 (1973). ⁷ М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат, Проблемы гидродинамики и их математические модели, М., 1973.