

К Р А Т К И Е С О О Б Щ Е Н И Я

04; 07
© 1992 г.

Журнал технической физики, т. 62, в. 6, 1992

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ СВЕЧЕНИЯ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

С. А. Салль

Согласно предложенным в [1,2] моделям шаровой молнии (ШМ), ее свечение создается при рекомбинации кластерной плазмы или горении химически активных частиц, а цветовое разнообразие определяется примесями сильноизлучающих веществ (натрий, калий и др.). При этом полная рассеиваемая мощность ШМ среднего размера оценивается в единицах киловатт. Однако следует учитывать следующие факты: 1) очевидцы в большинстве случаев отрицают тепловое воздействие от ШМ; 2) содержание примесей натрия, калия и др. в воздухе во время дождя минимально (концентрация NaCl в каплях дождя менее 1 мг/л [3]); 3) с ШМ как в природных условиях, так и в экранированных помещениях неразрывно связаны разнообразные электрические явления: радиоизлучение, искровые и дуговые разряды, наведение тока в проводниках, электрические поражения и т. д. Неоднократно высказывались более соответствующие наблюдательным фактам гипотезы о газоразрядной природе ШМ. В частности, предположение о высоковольтном стримерном разряде в ШМ [4,5] вполне согласуется с ее электрическими свойствами, радиоизлучением, звуковыми эффектами, запахом и измерением химического состава следа [4]. Однако в газоразрядных моделях ШМ необходим мощный внешний источник питания, что исключено [1,2,6]. В [7] это противоречие устранено и ШМ рассматривается как автономный генератор тока высокого напряжения. Согласно [7], в объеме ШМ имеет место радиальный стримерный коронный разряд, самоподдерживающийся за счет абсолютной отрицательной проводимости ее аэрозольной среды, содержащей капли воды субмикронного размера и ионизованный воздух, пересыщенный водяным паром. В ток преобразуется внутренняя тепловая энергия ШМ. Преобразование тепла в ток с использованием лишь одного термостата обусловлено неоднозначностью пфаффовской формы для количества тепла, поступающего в систему [8]. Энергия от ШМ отводится преимущественно излучением стримеров. В результате радиационного охлаждения водяной пар в объеме ШМ конденсируется, концентрация капель растет. Температура воздуха и капель в ШМ близка или несколько ниже, чем у окружающего воздуха.

Цель настоящей работы — рассмотреть оптические свойства ШМ в соответствии с гипотезой о самоподдерживающемся стримерном коронном разряде в ее объеме и сопоставить их с наблюдениями очевидцев.

Оценим размер капель в ШМ, принимая во внимание, что максимально возможная масса аэрозоля в ШМ среднестатистического радиуса $R = 14$ см порядка 1 г, а ее оптическая толщина $\tau \leq 1$ [2]. Пусть через центр ШМ, однородно заполненной монодисперсным аэрозолем, проходит коллимиро-

ванный монохроматический пучок света. При $\tau \ll 10$ связь интенсивностей пучка на выходе I и входе I_0 в приближении однократного рассеяния дается законом Бугера [9]

$$I = I_0 \exp(-\tau) = I_0 \exp(-2\gamma R), \quad (1)$$

где γ — коэффициент аэрозольного ослабления.

При радиусе капель r , их концентрации n и факторе эффективности ослабления k

$$\gamma = \pi r^2 nk. \quad (2)$$

Если плотность материала аэрозоля ρ , то

$$n = \frac{9M}{16\pi^2 \rho r^3 R^3}, \quad (3)$$

где M — масса аэрозоля в ШМ.

С учетом (1) и (2) находим

$$\tau = \frac{9kM}{8\pi\rho r R^2}. \quad (4)$$

График зависимости $\tau(r)$ при $R = 14$ см, $M = 0.1$ г, длине световой волны $\lambda = 550$ нм для случая воднокапельного аэрозоля представлен на рис. 1. В расчете использовались табулированные в [10] значения фактора эффективности ослабления. Для капель субмикронного размера условие $\tau \ll 1$ выполняется при $r \ll 0.07$ мкм. Если $M = 1$ г, то $r \ll 0.03$ мкм.

Рассмотрим вопрос о влиянии аэрозольного светорассеяния на цвет ШМ. Поскольку для капель воды субмикронного размера характер зависимости $k(\lambda)$ незначительно зависит от r , то расчет цветности выходящего из ШМ излучения будем также проводить для монодисперсного аэрозоля.

Координаты цвета X , Y , Z излучения, выходящего из ШМ по ее центральному лучу, определим по формулам

$$X = \int_{\lambda=380}^{\lambda=770} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda,$$

$$Y = \int_{\lambda=380}^{\lambda=770} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

$$Z = \int_{\lambda=380}^{\lambda=770} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda,$$

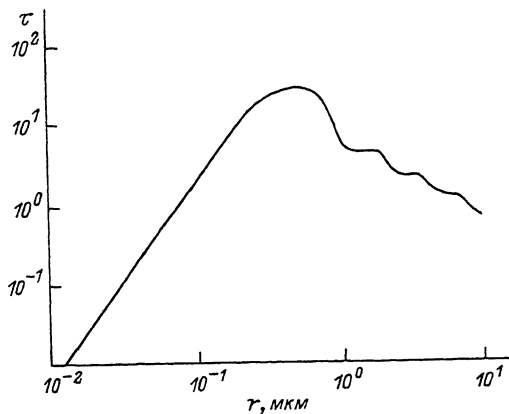


Рис. 1. Зависимость оптической толщины ШМ от радиуса капель.

где $\varphi(\lambda)$ — функция спектральной интенсивности излучения стримерной короны; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ — функции удельных координат цвета стандартного колориметрического наблюдателя [11]; $\rho(\lambda)$ — доля излучения с длиной волны λ , выходящего из ШМ по ее центральному лучу.

Координаты цветности центра ШМ будут равны

$$x = \frac{X}{\sigma}, \quad y = \frac{Y}{\sigma}, \quad z = \frac{Z}{\sigma}, \quad \sigma = X+Y+Z. \quad (6)$$

При определении $\rho(\lambda)$ учтем, что ШМ не является однородным излучателем. Очевидно часто отмечают наличие у ШМ ядра и оболочки либо нескольких слоев. В первом приближении примем следующую модель: ядро ШМ диаметром 20 см представляет собой однородный излучатель и окружено неизлучающей оболочкой такого же аэрозоля толщиной 4 см. Тогда оптическая толщина ядра составит $5\tau/7$, оболочки — $\tau/7$. Пренебрегая обратным рассеянием от тыльной части оболочки, находим

$$\rho(\lambda) = \frac{7[1 - \exp(-5\tau/7)] \exp(-\tau/7)}{5\tau}. \quad (7)$$

Отрицательная стримерная корона в воздухе имеет голубой цвет свечения, определяемый в основном излучением второй положительной системы молекулы $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$ [12]. Ввиду отсутствия экспериментальных данных по спектральному распределению излучения анодонаправленных стримеров во всей видимой области функцию $\varphi(\lambda)$ отрицательной стримерной короны зададим качественно с помощью спектра излучения воздушной плазмы с температурой 4000 К [13]. Цвет свечения положительной стримерной короны оранжевый и определяется излучением как второй, так и первой положительной системы $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+)$. Функцию $\varphi(\lambda)$ положительной стримерной короны зададим с помощью спектра излучения лампы накаливания (стандартный источник света А [11]).

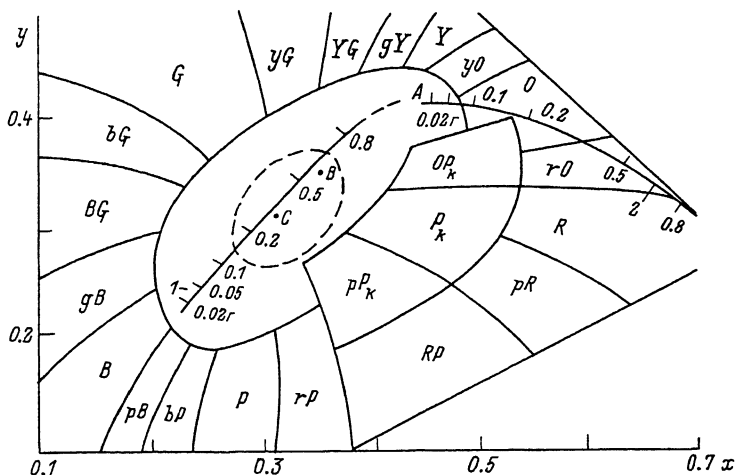


Рис. 2. Зависимость координат цветности центра ШМ от массы аэрозоля.

pB — пурпуровато-синий цвет, B — синий, gB — зеленовато-синий, BG — сине-зеленый, bG — синевато-зеленый, G — зеленый, yG — желтовато-зеленый, YG — желто-зеленый, gY — зеленовато-желтый, Y — желтый, yO — желтовато-оранжевый, O — оранжевый, OP_k — оранжево-розовый, gO — красновато-оранжевый, P_k — розовый, R — красный, pR — пурпуровато-красный, pP_k — пурпуровато-розовый, RP — красно-пурпурный, rP — красновато-пурпурный, P — пурпурный, bP — синевато-пурпурный. Область, ограниченная штриховой кривой, ахроматическая, или белая зона. A, B, C — стандартные источники МКО (лампа накаливания, прямой солнечный свет, рассеянный дневной свет).

Результаты расчета координат цветности ядра ШМ в зависимости от массы аэрозоля представлены на рис. 2 кривыми 1 (отрицательная стримерная корона) и 2 (положительная стримерная корона). На части цветового графика x, y для определения наименования цвета нанесена карта Келли [14]. В расчетах полагалось $r = 0.05$ мкм, а масса аэрозоля изменялась от 0 до 0.8 г. При этом оптическая толщина ШМ в максимуме чувствительности человеческого глаза изменялась от 0 до 4. Функция $\varphi(\lambda)$ при интегрировании по (5) разбивалась на участки $\Delta\lambda = 10$ нм. С ростом массы аэрозоля цвет ШМ с отрицательной стримерной короной меняется по Келли от слабого синего к ахроматическому (белому), а с положительной стримерной короной — от слабого желтовато-оранжевого к оранжевому, красновато-оранжевому и красному.

Прежде чем переходить к рассмотрению связи свечения с другими свойствами ШМ, проведем грубую оценку энергетики ее излучения. Примем, что в видимой области ШМ излучает ~ 4 Вт, как и лампа накаливания мощностью 60 Вт [11]. Для стримерной короны отношение энергии, излучаемой в ближней УФ области (200—400 нм), к излучаемой в видимой ~ 10 . Излучением в других областях спектра можно пренебречь. Следует учесть, что УФ излучение испытывает в аэрозоле многократное рассеяние и поглощается. Если, ближнее УФ излучение поглощается аэрозолем наполовину, то общая мощность излучения ШМ будет порядка 20 Вт, за среднее время жизни ~ 9 с она излучает около

200 Дж. Тогда собственная энергетика ШМ вполне обеспечивается конденсацией порядка 0.1 г водяного пара. Наша оценка энергии ШМ соответствует новому анализу энерговыделений, проведенному в [15]. Что касается значительных энерговыделений при взрывах или взаимодействии ШМ с предметами, то они связаны с выбросом аэрозоля в окружающее пространство, охлаждением больших масс воздуха с конденсацией водяного пара и преобразованием высвобождающегося тепла в механическую работу, ток и излучение [7].

По световой отдаче ШМ значительно превышает обычную стримерную корону и сравнима с лампой дневного света. Причина высокой интенсивности свечения ШМ при минимальном энерговыделении состоит в том, что электрическая мощность газового разряда в ШМ многократно превышает ее рассеиваемую мощность. Почти все выделяющееся в ШМ тепло преобразуется в неравновесное излучение. Отметим, что принципиальных ограничений на преобразование тепла в работу (или другой вид энергии) для систем, находящихся в сильнонеравновесном состоянии, не существует [16].

Рост массы аэрозоля в ШМ на 0.1 г при условии сохранения размера капель изменяет ее цвет незначительно (рис. 2). Поэтому цвет ШМ в большей степени определяется газоразрядными условиями и начальным состоянием аэрозоля. По-видимому, существуют два вида ШМ [17] — с отрицательной стримерной короной (первый вид) и с положительной (второй). При малых τ ШМ первого вида имеют голубой цвет, второго — оранжевый.

Обратимся к анализу корреляционных зависимостей между цветом и некоторыми другими свойствами ШМ [17].

1. Р а з м е р и ц в е т. С увеличением размера возрастает доля красных ШМ [17]. В рамках нашей модели этот факт объясняется ростом оптической толщины ШМ.

2. В р е м я ж и з н и и ц в е т. Вполне естественно предположить, что интенсивность процессов в ШМ увеличивается с ростом концентрации аэрозоля [7]. Поэтому голубые и оранжевые ШМ расходуют свою энергию медленнее, чем ШМ другого цвета, и имеют наибольшее время жизни [17].

3. Я р к о с т ь и ц в е т. Поскольку интенсивность процессов в голубых и оранжевых ШМ наименьшая, то они имеют и наименьшую яркость [18].

Находят объяснение также следующие факты: наличие ШМ разного цвета при редкости зеленого; наблюдение голубого ореола вокруг ШМ, связанного с рассеянием в оболочке выходящего из ядра излучения; некоторое преобладание голубых ШМ в хорошую погоду [1] из-за обратного рассеяния падающего на ШМ света. Хотя цвет ШМ изменяется редко, но все же на основании ряда наблюдений ([1], случаи 10, 55, 66, 104, 108) можно сказать, что имеется тенденция к покраснению ШМ в течение жизни. Это также, по-видимому, связано с ростом оптической толщины ШМ.

На свечение ШМ должен влиять также ряд других факторов: неоднородность ядра и оболочки, полидисперсность аэрозоля, многократное рассеяние при больших τ , изменение излучательных свойств стримерной короны, наличие примесей и т.д. В целом же соответствие оптических свойств ШМ в гипотезе самоподдерживающегося стримерного коронного разряда с наблюдениями очевидцев можно считать хорошим.

- [1] Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М. Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
- [2] Смирнов Б.М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988. 208 с.
- [3] Бримлумб П. Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 1988. 352 с.
- [4] Дмитриев М.Т. // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 2. С. 387—394.
- [5] Войцеховский М.Б. // ДАН СССР. 1986. Т. 288. № 2. С. 351—354.
- [6] Александров В.Я., Подмошенский И.В., Салль С.А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 1. С. 73—76.
- [7] Салль С.А. // Шаровая молния / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: Изд-во ИВТАН, 1990. С. 71.
- [8] Зильберглейт А.С., Скорняков Г.В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 12. С. 1—8.
- [9] Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 256 с.
- [10] Зельманович И.Л., Шифрин К.С. Таблицы по светорассеянию. Т. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 432 с.
- [11] Справочная книга по светотехнике. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.
- [12] Богданова Н.В., Певчев Б.Г. // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1974. № 4. С. 150—156.
- [13] Каменщиков В.А., Пластинин Ю.А., Николаев В.М. и др. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М.: Наука, 1971. 440 с.
- [14] Агостон Д. Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне. М.: Мир, 1982. 184 с.
- [15] Степанов С.И. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 211—212.
- [16] Скорняков Г.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 22. С. 12—14.
- [17] Григорьев А.И., Григорьева И.Д. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 2. С. 79—87.
- [18] Grigor'ev A.I., Grigor'eva I.D., Shirjaeva S.O. // Science of Ball Lightning / Ed. Y.H. Ohtsuki. Singapore: World Scientific, 1989. P. 88.

Всероссийский научный центр
(ГОИ им. С.И. Вавилова)
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
24 июля 1989 г.
В окончательной редакции
11 июня 1991 г.