

Письма в ЖЭТФ, том 18, вып. 3; стр. 193 – 196

5 августа 1973 г.

О ПРИРОДЕ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

И. П. Стаканов

Предполагается, что рекомбинация в шаровой молнии задерживается образованием сольватных оболочек вокруг ионов в газовой фазе. Приведены оценки поверхностного напряжения вещества молнии и ее устойчивости.

Полученные недавно данные [1] показывают, что излучение свободно выходит из объема шаровой молнии и, следовательно, ее температура T значительно ниже 10^4 °К, так как при такой температуре длина свободного пробега излучения была бы очень мала. С другой стороны молния плавит провода, проходя около них [2] и поэтому T должна быть не меньше $600 - 1000$ °С

Для того, чтобы объяснить почему несмотря на низкую температуру, шаровая молния не исчезает в результате рекомбинации, предположим, что она образуется при распаде канала обычной молнии в присутствии большого количества воды. Молекулы воды, имеющие большой дипольный момент, притягиваются к положительным и отрицательным ионам (O^-), образуя вокруг них сольватные оболочки. Легко подсчитать, что расстояние между ионами и центром диполя $2 - 2,5 \text{ \AA}$, а энергия связи молекулы воды с ионом $1,4 - 0,9 \text{ эв}$. Если сольватная оболочка состоит из $3 - 5$ молекул воды, то для разрушения ее потребуется около 4 эв , что практически исключает возможность рекомбинации в газовой фазе при соударениях (при $T = 1 - 2 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$).

При конденсации нескольких ионов в одну "каплю" вероятность рекомбинации возрастает. Однако, скорость рекомбинации через образование жидких капель не может быть большой, так при этом выделяется много тепла, "капля" испаряется и в результате вся система поддерживается при достаточно высокой температуре, препятствующей быстрой конденсации. Образование "капель" наиболее вероятно при неупругом соударении двух разноименных ионов (с выбрасыванием молекулы воды из сольватной оболочки). Однако, энергия связи такой "капли" должна быть мала из-за ослабления кулоновского взаимодействия ионов вследствие большой диэлектрической проницаемости воды. Кроме того при сближении разноименных ионов их сольватные оболочки поляризуются и мешают тесному контакту. Поэтому нейтральные "капли" должны легко распадаться при соударениях.

Пусть $\theta \ll 1$ отношение числа "капель" к числу пар свободных сольватированных ионов, τ_1 — среднее время рекомбинации в капле, $1/\nu$ — время жизни сольватной оболочки иона. Тогда для времени рекомбинации молнии τ получим

$$1/\tau = \theta/\tau_1 + \nu \approx \theta/\tau_1. \quad (1)$$

Величина частоты ν определяет устойчивость системы. Действительно, количество выделяющегося (в 1 сек) при рекомбинации тепла EN/τ , где N — число пар ионов в системе, должно быть равно теплоотдаче через ее поверхность S , т. е.

$$EN/\tau = hS(T - T_o), \quad (2)$$

где h — коэффициент теплопередачи, T_o — температура окружающего воздуха. Рассмотрим отклонение δT от установившейся температуры T при постоянных N и S . Пусть $\nu \sim \exp(-E_1/T)$, где коэффициент E_1 — порядка энергии связи сольватных оболочек ($E_1/T > 1$), зависимостью θ, τ_1, h от T можно пренебречь. Система будет устойчива, если рост выделения тепла при увеличении температуры окажется меньше увеличения теплоотдачи, т. е. согласно (1) и (2), если

$$\tau \nu \frac{E_1}{T} < \frac{1}{1 - T_o/T} \approx 1. \quad (3)$$

При не слишком больших T коэффициент $\tau \nu$ мал и условие (3) выполняется. Если, однако, температура повышается, например, вследствие

уменьшения коэффициента теплопередачи в закрытом помещении, то ν резко возрастает и условие (3) может оказаться нарушенным (даже при $r\nu < 1$). Развивающаяся неустойчивость приводит к быстрому росту температуры и к цепной реакции разрушения сольватных оболочек, т. е. к взрыву.

Оценим энергию шаровой молнии. Энергия ионизации атомов О и Н равна 13,5 эв. С учетом дальнейших химических реакций, полная энергия, освобожденная при рекомбинации пары ионов составляет около 19 эв. На разрушение сольватных оболочек двух ионов тратится предположительно 8 эв и на разложение $O^- = 2 e^-$. Таким образом на каждую пару ионов в конечном счете выделяется приблизительно 9 эв. Если при $T = 1000^{\circ}\text{K}$, $P = 1 \text{ atm}$ число пар ионов $n = 0,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, то их энергия равна $7,2 \text{ дж}/\text{см}^3$. Это дает для молнии с радиусом $R = 15 \text{ см}$ около 10^5 дж , что хорошо согласуется с экспериментальной оценкой, полученной в [3].

Одновременно решается вопрос почему молния, несмотря на сравнительно высокую температуру не поднимается вверх в холодном воздухе. Если в сольватной оболочке иона содержится 4 молекулы воды, то молекулярный вес H^+ равен 73, а $O^- - 88$. Это дает плотность вещества около $1,30 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$, что приблизительно равно плотности воздуха. Легко подсчитать также, что вследствие большой массы ионов их излучение за время жизни молнии ($1 - 100 \text{ сек}$) пренебрежимо мало. Таким образом энергетические потери молнии определяются конвективным теплообменом.

Необходимо еще объяснить почему молния не разваливается в результате развития конвективной неустойчивости, а также из-за неустойчивости тангенциального разрыва, возникающего при ее движении. Заметим, что дальнодействующие кулоновские силы должны приводить к значительному поверхностному натяжению σ . Так, для большинства жидких металлов оно заключено между 500 и $1000 \text{ эрт}/\text{см}^2$ по сравнению с $20 - 30 \text{ эрт}/\text{см}^2$ у органических жидкостей. Далее поверхностное натяжение всех сильных электролитов (за исключением HCl) линейно растет с увеличением концентрации раствора. Значение σ для ионов, которые можно рассчитать из этих данных составляет около $150 \text{ эрт}/\text{см}^2$. Естественно предположить, что при одинаковом характере молекулярных сил σ пропорциональна числу частиц на 1 см^2 , т. е. $n^{2/3}$. Поскольку для жидкостей $n = 10^{22} \text{ см}^{-3}$, а для молнии $n = 10^{19}$, то $\sigma \approx 2 - 5 \text{ эрт}/\text{см}^2$ для шаровой молнии.

Расчет, который будет опубликован позднее, показывает, что молния сохраняет устойчивость по отношению к возбуждению поверхностных волн при

$$\eta = \sqrt{\frac{g |\rho - \rho_0|}{2\sigma}} R \leq 2,5. \quad (4)$$

Приблизительно то же условие ($\eta \leq 1$) необходимо для того, чтобы молния имела сферическую форму [4]. Это означает, что плотность вещества молнии ρ должна очень мало отличаться от плотности окружающего воздуха ρ_0 . Так при $R = 15 \text{ см}$ условие устойчивости нарушается при $|\rho - \rho_0|/\rho_0 \geq 0,10 - 0,20$. Вследствие этого выгорание

значительной доли вещества молнии представляется очень маловероятным, поскольку это должно приводить к заметному изменению ρ и соответственно $|\rho - \rho_0|$ (из-за изменения молекулярного веса). При спокойном распаде (без взрыва) молния должна исчезать не от недостатка энергии, а разваливаться из-за развития неустойчивости, выбрасывая из себя куски вещества (очевидцы принимают это за "искрение" или "кипение" молнии).

Поступила в редакцию
4 июня 1973 г.

Литература

- [1] М.Т.Дмитриев, В.М.Дерюгин, Г.А.Калинкевич. ЖТФ, 42, 2187, 1972.
 - [2] J . D. Barry J . Atm. Terr . Phys., 29, 1095, 1967.
 - [3] P. D. Zimmerman. Nature, 228, 853, 1970.
 - [4] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. "Механика сплошных сред", М., Гостехиздат, 1953.
-