

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ  
ШАРОВОЙ МОЛНИИ

А. С. Тарновский

Предложенные в [1, 2] возможные модели шаровых молний в настоящее время являются наиболее популярными [3]. Однако ни одна из них не может объяснить зарегистрированных случаев значительных энерговыделений (сотни кДж и более) при взрывах шаровых молний.

В [3] указано на возможный механизм накопления в шаровой молнии значительных запасов энергии. В случае газоразрядной плазмы при атмосферном давлении существует критическая концентрация ионов (разных знаков)  $n_{кр} = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , выше нее начинается кулоновское сжатие, предел которому, по идее И. П. Стаханова [1], могут положить длинные гидратные цепи сольватных оболочек. Поэтому при сжатии может быть достигнута плотность ионов  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  и более.

Возникает, однако, вопрос, как достичь значения  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . В [3] предполагается, что шаровая молния образуется вблизи канала линейной молнии, где давление может превысить 100 атм и концентрация ионов достигает приемлемой начальной величины с последующим кулоновским сжатием.

Однако, как легко понять, плотность в такой шаровой молнии значительно бы превышала плотность окружающей атмосферы и шаровая молния под действием собственного веса стремительно падала бы вниз. Кроме того, известны случаи [1, 2] образования шаровых молний и в отсутствие линейных грозовых разрядов.

Б. М. Смирнов [2, с. 185] считает, что только химический способ хранения энергии может обеспечить достаточно длительное время существования шаровой молнии и значительное энерговыделение при ее взрыве. Однако при этом конкретный вид энергии и процесса, приводящий к ее спонтанному и стремительному выделению, не указаны. Поэтому вопрос об источнике энергии, выделяющейся при взрыве шаровой молнии значительной мощности, следует считать открытым.

По нашему мнению, для того чтобы иметь возможность объяснить наблюдавшиеся факты энерговыделения при взрыве шаровой молнии в 1000 кДж и более, следует допустить, что энергия запасается не в шаровой молнии, а в окружающем ее пространстве.

Предлагавшиеся до сих пор модели шаровой молнии с внешним источником энергии, например вариант П. Л. Капицы [4] с электромагнитной накачкой, пока не привели к разработке конкретных деталей процесса, даже решение принципиальных вопросов наталкивается на серьезные трудности. Так, в модели П. Л. Капицы необходима мощная коротковолновая радиостанция.

Цель настоящей заметки — обратить внимание на то, что дополнительным источником энергии при взрыве шаровой молнии может быть ударная лавинообразная конденсация пересыщенных водяных паров, которые могут при определенных условиях содержаться в атмосфере.

Согласно [5, с. 442], в отсутствие конденсированной фазы и посторонних центров конденсации равновесная конденсация невозможна. В таком случае может быть достигнуто значительное пересыщение паров. Например, легко достигается 5—6-кратное пересыщение водяных паров.

Возможны и более высокие степени пересыщения водяного пара в атмосфере. Однако, очевидно, должно существовать предельно возможное при данных условиях значение пересыщения, которое мы для простоты дальнейших оценок примем равным (по порядку величины) 10.

Вблизи этого критического значения коэффициента пересыщенности пара состояние водяного пара становится неустойчивым. Достаточно незначительного дальнейшего увеличения степени пересыщенности, например, в результате адиабатического расширения воздуха с последующим охлаждением или же появления центров конденсации в некоторой области, как в ней начнется быстрый процесс конденсации и этот процесс может распространиться с большой скоростью (вплоть до скорости звука в воздухе) на обширные прилегающие области. Такая конденсация приведет к падению давления воздуха и вызовет газодинамическую волну, направленную к центру конденсации с последующим резким ростом давления. Существует

ный вклад в это повышение давления даст выделение значительного количества тепла при конденсации влаги.

Если принять за основу одну из моделей [1, 2], но допустить возможность ее спонтанного и достаточно быстрого разрушения, например, вследствие кулоновского сжатия и последующего разрушения длинных гидратных цепей [1] или других кластерных образований [2], то оба указанных выше условия (быстрое падение давления и образование многочисленных центров конденсации в виде фрагментов кластеров) в момент разрушения шаровой молнии в атмосфере, содержащей пересыщенные водяные пары, оказываются выполненными.

При нормальной температуре ( $t=20^\circ\text{C}$ ) абсолютная влажность, насыщающая воздух, составляет  $17.32\text{ г/м}^3$  [6, с. 283]. Причем это число быстро растет с температурой и при  $t=40^\circ\text{C}$  составляет уже  $65.31\text{ г/м}^3$ .

Для пересыщенного пара возьмем число  $200\text{ г/м}^3$ . Если при ударной конденсации конденсируется хотя бы половина этого количества, то в каждом кубическом метре воздуха выделяется  $\sim 225\text{ кДж}$  энергии. Если допустить, что ударная конденсация может охватывать десятки кубических метров воздуха, то энерговыделение, связанное с этим процессом, может превысить  $10\,000\text{ кДж}$ .

Дополнительная энергия выделится в результате работы сжатия, совершаемой внешними слоями воздуха над областью с пониженным давлением.

Каков же сценарий мощной шаровой молнии?

1. В атмосфере сильно пересыщенного воздуха происходит разрушение обычной шаровой молнии с резким падением давления и выбросом мелких фрагментов ее кластерной структуры в окружающее пространство.

2. Происходит падение давления, понижение температуры и усиленная конденсация шаров жидкости в окружающем пространстве объемом до десятков  $\text{м}^3$ .

3. Более отдаленные (от места взрыва шаровой молнии) слои воздуха, не подвергшиеся ударной конденсации, совершают работу сжатия воздуха в ближней зоне, приводя его к разогреву. Дополнительное тепло выделяется в результате конденсации влаги.

4. Возникает концентрическая газодинамическая волна, направленная к центру шаровой молнии и усиливающая разрушительное действие шаровой молнии (кумулятивный эффект).

Таким образом, разрушительное действие шаровой молнии в нашей картине подобно действию вакуумной бомбы. Разумеется, не вся энергия, выделившаяся в различных участках, в том числе и далеких от места взрыва, даст вклад в разрушительный эффект взрыва молнии. Однако давление внешних слоев воздуха и кумулятивная газодинамическая волна должны привести к переносу значительной части выделяющейся энергии в область, близкую к месту разрушения шаровой молнии. Во всяком случае максимальная энергия разрушительного действия такого взрыва может достигать тысяч кДж.

Какие же доступные наблюдения следствия вытекают из предложенного варианта взрыва мощной шаровой молнии и подтверждаются ли они известными фактами?

1. В обычных условиях, т. е. когда нет признаков пересыщенности атмосферы влагой, взрывы шаровых молний должны быть маломощными, «тихими». Автор наблюдал такой совершенно бесшумный «взрыв» шаровой молнии в спокойной, «нормальной» атмосфере.

2. Состояние пересыщенности атмосферы влагой — довольно редкое явление, поэтому мощные взрывы шаровых молний должны быть относительно редкими по сравнению с маломощными взрывами. В действительности так оно и есть [1, 2].

3. В случае последовательных (с небольшим промежутком времени) взрывов двух или более шаровых молний в одном и том же месте мощным может быть взрыв только первой молнии, после чего в результате частичной конденсации пересыщенных паров влаги условия для усиления мощности взрыва исчезнут. Недавно, действительно, наблюдался взрыв двух шаровых молний подряд (сообщение по радио). Из них мощным был только первый взрыв, второй — легкий хлопок.

4. «Влагодатмосферное» усиление мощности должно происходить не только при взрыве шаровой молнии, но и в других случаях резкого падения давления в некоторой части пространства, наполненного влагопересыщенным воздухом. Как известно автору, при взрыве вакуумированной электролампы, если этот взрыв происходит в насыщенном влагой помещении, воспринимаемая на слух мощность взрыва возрастает. С. Сингер [6, с. 136] отмечает: «Для объяснения взрывов с сильным звуком внутри помещений, которые, однако, не вызывают никаких разрушений, шаровая молния сравнивалась с пустотной электролампой».

5. Идея конденсационного взрыва может оказаться ключевой для понимания и некоторых других неразгаданных явлений природы. Можно предположить, что смерть возникает

следующим образом. Линейный разряд протяженностью порядка сотен метров и выше в пространстве, содержащем пересыщенный пар, создает цилиндр, содержащий центры конденсации — ионы. Последующая цилиндрическая волна конденсации и понижения давления на определенном этапе сменяются кумулятивной цилиндрической волной сжатия, которая, согласно [7, с. 341], является неустойчивой, так что «дополнительная степень свободы (вращение), будучи возбуждена сколь угодно слабо, постепенно отнимает всю энергию осевого движения (схождения) и ограничивает кумуляцию». Возникшее на последнем этапе вихревое движение воздуха, по-видимому, и представляет собой смерч.

В подтверждение «конденсационной» идеи возникновения смерча укажем на некоторые особенности этого явления: «Он (смерч) возникает в грозовую погоду, когда через данную местность проходит фронт теплого воздуха и на некоторой высоте понижается давление воздуха» [2, с. 157], т. е. когда возможно возникновение пересыщенных водяных паров в воздухе и весьма вероятно различное рода газовые разряды. Обратим внимание, что «при движении смерча нередко наблюдаются шаровые молнии» [2, с. 162], однако мощные взрывы таких шаровых молний не отмечались (это понятно: конденсационный механизм уже сработал). Далее: «Одно из удивительных свойств смерча — высокая разреженность воздуха внутри вихря» [2, с. 159] может быть понята как возникшая первоначально в результате конденсации влаги и затем стабилизированная вихревым движением.

В заключение оценим параметры конденсационного взрыва, вызванного разрушением шаровой молнии. Согласно [2, с. 113], «твердые частицы, которые образуют кластер, имеют размер не более 1 мкм». . . «с плотностью 2 г·см<sup>-3</sup>». Полагая, что в результате взрыва или распада каркаса на отдельные частицы масса частицы оказывается порядка 10<sup>-11</sup> г и что «средний удельный вес каркаса порядка удельного веса атмосферного воздуха» [2, с. 101], найдем число частиц, образовавшихся в единице объема  $n_0 = 10^8$  см<sup>-3</sup>. Тот же порядок, точнее 3·10<sup>8</sup> см<sup>-3</sup>, может иметь плотность ионов в зоне шаровой молнии [2, с. 112]. Г. А. Воробьев [3] считает возможным допустить концентрацию ионов порядка 10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> и выше, что могло бы привести к практически мгновенной конденсации водяных паров. Однако оценка Г. А. Воробьева вряд ли является реалистической.

Подсчитаем время конденсации  $\tau_{\text{кон}}$ . Положим

$$C \cdot u \cdot 4\pi r_0^2 \cdot n_0 = -dC/dt,$$

где  $C$  — концентрация влаги в воздухе,  $u$  — тепловая скорость молекул пара ( $\sim 10^5$  см/с). Очевидно, характерное время по порядку величины составит  $\tau_{\text{кон}} = (4\pi r_0^2 n_0 u)^{-1} \approx 10^{-6}$  с.

В результате конденсации части пара в объеме шаровой молнии давление понизится приблизительно на 10 %. Что приведет к расширению прилегающего шарового слоя воздуха толщиной  $r_1 = 10$  см за время  $\tau_1 \sim r_1/v_{\text{зв}}$ , где  $r_1$  — радиус шаровой молнии,  $v_{\text{зв}}$  — скорость звука в воздухе. Адиабатическое понижение температуры в прилегающем слое вызовет конденсацию паров.

Время конденсации в прилегающем слое (и в последующих слоях) возьмем на порядок больше времени конденсации в первоначальной области шаровой молнии, т. е. положим  $\tau_2 \sim 10^{-5}$ . Скорость распространения зоны конденсации положим равной  $r_1/(\tau_2 + r_1/v_{\text{зв}}) = r_1 v_{\text{зв}}/(r_1 + v_{\text{зв}} \tau_2)$ .

Что же положит конец распространению конденсационной волны? Возможны два варианта. Во-первых, область, занятая пересыщенным паром, может иметь сравнительно небольшие размеры. Волна пониженного давления, достигнув ее границы, сменится волной сжатия, направленной к центру шаровой молнии. В случае более обширной области, занятой пересыщенным паром, возможны самопроизвольное прекращение распространения конденсационной волны разрежения и смена ее концентрической волной сжатия.

После первоначальной конденсации в зоне шаровой молнии волна сжатия из прилегающего слоя в течение времени  $r_1/v_{\text{зв}}$  заполнит эту зону и затем образует расходящуюся волну повышенного давления, которая, двигаясь с некоторой задержкой по сравнению с первоначальной конденсационной волной, но с более высокой скоростью, в конце концов догонит волну разрежения и положит конец распространению конденсации

$$v_{\text{зв}}(t - \tau_1) = v_{\text{зв}} r_1 t / (r_1 + v_{\text{зв}} \tau_2),$$

откуда радиус зоны конденсации  $R = r_1 \tau_1 / \tau_2 = 10$  м, т. е. объем области, где происходит конденсация с последующим понижением давления, может достигать тысяч м<sup>3</sup>. В среднем давление в этой области, в том числе и на ее границе, к моменту завершения конденсации может быть несколько ниже давления в окружающем пространстве. Поэтому процесс расширения области пониженного давления в какой-то момент времени должен смениться концентрической ку-

кумулятивной волной сжатия, которая в центре области может привести к значительному повышению температуры [7].

Мы не учитывали возможность передачи тепла от разогретых в результате конденсации капелек и кластерных фрагментов окружающему воздуху. Преждевременная тепловая релаксация могла бы предотвратить распространение волны конденсации. Можно показать, что в условиях нашей задачи время тепловой релаксации в области шаровой молнии больше времени задержки распространения волны повышенного давления, и поэтому возможность возникновения кумулятивной волны сохраняется. Однако учет тепловой релаксации в области шаровой молнии приводит к выводу о неэффективности конденсационного механизма в случае гигантской шаровой молнии с радиусом более метра и невозможности конденсационных взрывов, охватывающих неограниченно большие области (радиусом более десяти метров).

### Список литературы

- [1] Стаганов И. П. О физической природе шаровой молнии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
- [2] Смирнов В. М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988. 208 с.
- [3] Воробьев И. А. Возможный механизм образования шаровой молнии // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 4. С. 814.
- [4] ФЭС. Т. 2. М.: Сов. энциклопедия, 1962. 608 с.
- [5] ФЭС. Т. 1. М.: Сов. энциклопедия, 1960. 664 с.
- [6] Сингер С. Природа шаровой молнии. М.: Мир, 1973. 240 с.
- [7] Забабахин Е. И. // Механика в СССР за 50 лет. Т. 2. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 880 с.

Куйбышевский государственный педагогический институт

Поступило в Редакцию

7 декабря 1988 г.

В окончательной редакции

17 июля 1989 г.

06; 07

Журнал технической физики, т. 60, в. 3, 1990

© 1990 г.

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ТРАНСПАРАНТОВ НА ОСНОВЕ В-ЭФФЕКТА

Ф. Л. Владимиров, И. Е. Моричев, Н. И. Плетнева, Т. О. Решетникова

Расширение функциональных возможностей и улучшение характеристик оптически управляемых транспарантов (ОУТ) типа фотопроводник—жидкий кристалл (ФП—ЖК) представляет большой научный и практический интерес. Одной из важных задач оптической обработки информации, успешно решаемой при помощи ОУТ, является повышение контраста изображений в реальном масштабе времени [1].

Специфические условия функционирования ОУТ в этом случае требуют применения модулирующих сред с большой крутизной электрооптической характеристики и достаточно высоким пороговым напряжением. Анализ известных электрооптических эффектов показывает, что одним из эффектов, удовлетворяющих указанным требованиям, является В-эффект в нематических ЖК. Ранее этот эффект в ОУТ практически не использовался из-за отсутствия эффективных методов гомеотропной ориентации с выделенным направлением переориентации под действием управляющего напряжения.

Суть В-эффекта состоит в изменении двулучепреломления под действием управляющего напряжения. В начальном состоянии молекулы ЖК ориентированы гомеотропно. Двулучепреломление в этом случае отсутствует, поэтому пропускание ячейки в скрещенных поляризаторах минимально. При наложении на слой ЖК электрического поля директор отклоняется от начального положения, в связи с чем в слое ЖК возникает двулучепреломление, пропускание ячейки при этом увеличивается.