Math-Net.Ru
All Russian mathematical portal

V. N. Kunin, V. S. Pleshivtsev, L. V. Furov, Experimental studies of the nature of ball lightning, *TVT*, 1997, Volume 35, Issue 6, 866–870

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
http://www.mathnet.ru/eng/agreement

Download details:
IP: 82.58.0.207
September 29, 2019, 11:47:10

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 1997, том 35, № 6, с. 866–870

УДК 537.523

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРИРОДЫ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

© 1997 г. В. Н. Кунин, В. С. Плешивцев, Л. В.Фуров

Владимирский государственный технический университет

Поступила в редакцию 11.07.96 г.

Приведены результаты экспериментов по получению плазменного образования, являющегося лабораторным аналогом шаровой молнии, на специально созданной для этого установке. Время его послесвечения в свободной атмосфере достигает 2 с в видимой области спектра. Дано описание визуальных наблюдений и с привлечением фото- и видеоинформации рассмотрены физические процессы, ответственные за его формирование. Сравниваются среднестатистические параметры шаровой молнии с характеристиками ее лабораторного аналога.

Экспериментальные исследования, проводимые с целью получения шаровой молнии (ШМ) в лабораторных условиях, многочисленны и имеют солидную историю. Несмотря на то, что получить образование, соответствующее по многим параметрам реальной ШМ, не удалось [1], интерес к этим экспериментам не угасает.

Во Владимирском государственном университете исследования по созданию и изучению устойчивых плазменных образований (ПО) в форме тороидального вихря проводятся уже около 20 лет. Предполагается, что природные вихревые образования возникают при ударе линейной молнии и затем трансформируются в шаровую молнию.

Эксперименты проводятся на экспериментальной базе (полигоне) на уникальных крупномасштабных установках, обеспечивающих параметры явлений, близкие к природным. Плазменные вихри образуются при электрическом взрыве круглых металлических диафрагм мощным импульсом тока [2, 3]. Для этого созданы уникальные накопители энергии: копровый [4], индукционный [5], а также пороговой генератор. В первые 7 лет исследований было обнаружено, что наряду с обычными для плазмы имеют место следующие аномальные эффекты, которые не поддаются объяснению с позиций картины остывающей вследствие теплового излучения плазмы:

1. Время высвечивания плазменных образований аномально высоко (до нескольких секунд).

2. Приблизительно в 10% опытов в конце существования образований возникает усиление их светимости (рис. 1).

3. Запас энергии в единице объема, оцениваемый по энергии высвечивания, аномально высок.

4. Длительность светимости в функции силы тока в электрическом импульсе, взрывающем диафрагму, носит пороговый характер. При диаметре диафрагмы 100 мм и силе тока менее 10.5 кА длительность светимости мала и слабо зависит от силы тока ($dt_п/dI = 6.88 \times 10^{-3}$ с/кА). При больших токах время жизни ПО очень быстро нарастает с увеличением тока ($dt_п/dI = 0.46$ с/кА) (рис. 2).

В литературе имеется множество теорий, объясняющих длительное свечение шаровой молнии путем накопления энергии веществом молнии. К сожалению, экспериментальная проверка их адекватности, как правило, отсутствует. В некоторых теориях длительное выделение энергии шаровой молнией связывают с ее поступлением извне. Такие теории предполагают наличие каких-то природных явлений, физика которых неясна.

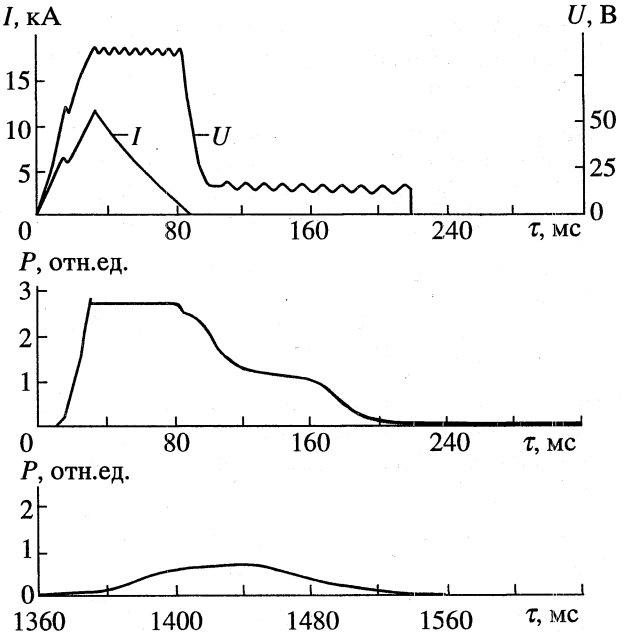

Рис. 1. Характерные зависимости силы тока I, падения напряжения U и потока излучения P от времени τ.

Для объяснения совокупности аномальных эффектов в 1983 г. была предложена оптическая модель шаровой молнии [6], по которой ШМ представляет собой потенциальную яму для электромагнитного излучения. Для подтверждения этой гипотезы был проведен ряд экспериментов.

В экспериментах использовался индукционный накопитель, от которого энергия подводилась к плазменной пушке. Она представляет собой электродную систему из кольцевого токоподвода, металлической диафрагмы и центрального штыревого токоподвода (рис. 3). На текстолитовый стол *1* с помощью оправки *4* и нижнего кольцевого токоподвода *3* закрепляется проводящая диафрагма *2*. На оправку *4* положен диэлектрик *7*, на котором расположен верхний кольцевой токоподвод *6*. Электрический импульс подводится от кольцевых токоведущих шин *9* и *11*, скрепленных между собой фторопластовыми изоляторами *10*. Диаметр токоведущих шин 60 см. Токоведущие шины *9* и *11* соединены проводами *8* и *12* с оправкой *4* и верхним кольцевым токоподводом соответственно. Включение диафрагмы в электрическую цепь плазменной пушки осуществляется через поджатый к ней нижний кольцевой токоподвод и систему медных проволочек, которые одними концами закреплены на верхнем кольцевом токоподводе, а другими концами соединены друг с другом в пучок, образуя центральный электрод, поджимаемый к диафрагме в ее центре. Такая конструкция токоподводов к диафрагме ("паучок") образует тороидальную катушку, в которой при протекании тока возникает магнитное тороидальное поле (магнитный тор).

Диафрагма металлическая (сталь, медь, алюминий), в форме круга малой толщины. В большинстве экспериментов использовались диафрагмы, составленные из семи слоев алюминиевой фольги. Толщина каждого слоя 8 мкм. Центральный электрод в различных опытах состоял из четырех, шести или восьми медных проволочек. Нижний кольцевой токоподвод *3* выполнялся из немагнитного материала (нержавеющая сталь) с внутренним диаметром 100 мм.

В данной работе накопленный экспериментальный материал анализируется с позиций гипотезы о накоплении электромагнитной энергии [6–8].

Для того чтобы световой луч вследствие рефракции отклонялся к центру вихря, образуя кольцо (потенциальную яму), необходимо, чтобы концентрация электронов падала к оси и, как следствие этого, показатель преломления увеличивался к оси вихря. Это приведет к тому, что в результате рефракции световой луч также будет отклоняться к центру ПО. Такая ситуация возможна, если температура плазмы в торе превышает температуру полной однократной ионизации. Тогда совокупность световых колец будет

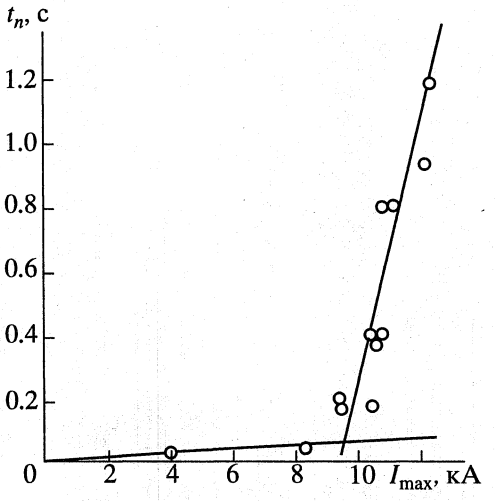

Рис. 2. Зависимость экспериментального времени послесвечения от максимальной силы тока.

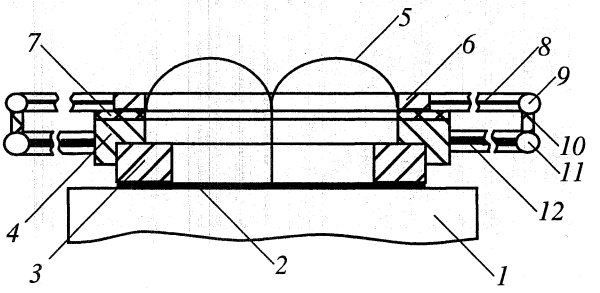

Рис. 3. Конструкция плазменной пушки.

образовывать замкнутую область, аккумулирующую энергию электромагнитного поля. Экспериментальным подтверждением факта накопления энергии в ПО может служить не только его длительное послесвечение, но и наблюдение за поляризованным излучением плазменного тора [9].

На основе визуальной, фотографической и видеоинформации, фотометрирования ПО и измерения электрических параметров в эксперименте можно предположить следующую последовательность протекающих процессов:

1. Взрыв диафрагмы. При этом часть продуктов взрыва разлетается из пушки по радиальным траекториям и быстро гаснет. Над пушкой образуется типичный для взрыва "гриб", верхняя часть которого – тороидальный вихрь, а нижняя – газодинамический след, постепенно отстающий от вихря.

2. В плоскости тора (что подтверждается наличием поляризованного излучения, исходящего из этой области [9]) возникают условия закольцовки излучения. Орбиты закольцовки расплываются, выходя из плоскости тора, и он покрывается оболочкой из электромагнитных волн. Поскольку

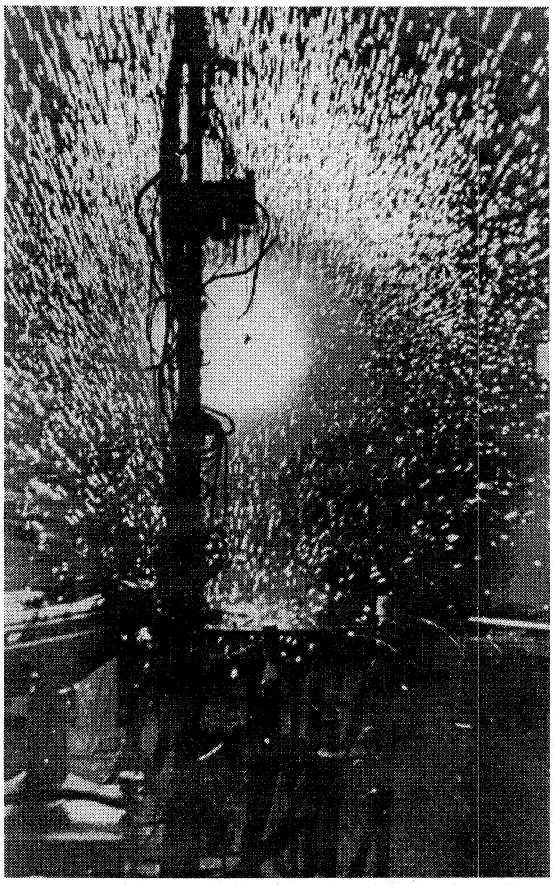

Рис. 4. Фотография лабораторного аналога шаровой молнии в опыте № 3 24.01.96.

эта оболочка светится, то видно, что плоский "бублик" превращается сначала в сплюснутый, а потом в почти правильный шар. Отметим, что шар является наиболее устойчивой формой ПО. Нарушение шарообразной формы связано с локальным уменьшением радиуса кривизны поверхности. Это немедленно вызовет ухудшение условий рефракции и излучение энергии из этой области (в первую очередь, в виде коротких волн), что приведет к восстановлению шарообразной формы.

3. Шар движется, имея внутри себя плазменный и совмещенный с ним магнитный торы с вмороженными частицами конденсированной дисперсной фазы (КДФ). Тор является носителем тепловой энергии и формирует необходимый градиент температуры, а, следовательно, и градиент электронной концентрации.

4. Постепенно тепловая энергия расходуется (в основном на коротковолновое излучение), шар краснеет и, наконец, исчезает как светящееся тело в видимой области спектра. В конце эксперимента возникает обыкновенный дымный тор. Его появление означает гибель лабораторного аналога шаровой молнии.

При исчезновении природной шаровой молнии иногда наблюдается возникновение дымки или сажистых следов, однако не в той степени, как в описываемых опытах. Это расхождение связано, видимо, с тем, что при ударе линейной молнии температура оказывается существенно выше, а концентрация частиц КДФ – ниже. Уровень запасенной тепловой энергии, определяемый давлением, оказывается того же порядка ($nkT = P$).

Рассмотрим фотографию светящегося шара (рис. 4), полученную в затемненной лаборатории в момент завершения его формирования. На фотографии хорошо видны кольцевые токоподводы к плазменной пушке. Пушка находится в одной плоскости с нижним кольцом. При подаче на диафрагму импульса тока она взрывается, образуя ослепительную сферу (световая мощность порядка нескольких сот киловатт). В результате теплового излучения большая сфера из продуктов сгорания материала диафрагмы быстро гаснет и становится более темной по сравнению со светящимся центральным шаром. На фотографии также видно много светящихся частичек с траекториями, исходящими из плазменной пушки, которые в основном обогнали плазменное образование. Внутри сферы образуется тороидальный плазменный вихрь. Жидкие частицы КДФ, будучи положительно заряженными, вмораживаются в магнитный тор. Играя роль аккумулятора тепловой энергии, они обеспечивают необходимый градиент температур. Исследование размеров частиц КДФ, осажденных на стеклянные пластинки, позволяет считать, что в объеме вихря имеется достаточное количество частиц микронного размера. Расчет среднего значения индукции магнитного поля по сечению тора на момент взрыва диафрагмы дает 0.1 Тл. По видеоинформации получены радиусы орбит, по которым движутся частицы КДФ в магнитном поле. При радиусе орбиты 3.4 см частица КДФ ($d = 1$ мкм) будет вморожена в магнитное поле ПО, если она несет заряд $q = 3.6 \times 10^{-13}$ Кл.

По мере расходования энергии частицы КДФ остывают, их заряд уменьшается (процесс эмиссии электронов равновесный), радиус траекторий растет и наиболее холодные частицы вылетают из тора. Как видно из рис. 4, траектории этих частиц исходят не из плазменной пушки, а из светящегося образования.

После исчезновения светящегося шара, движущегося вверх, под потолком лаборатории образуется "плотный" (по зрительному восприятию) тороидальный дымный вихрь.

Ранее предполагалось, что плазменный вихрь представляет собой шаровую молнию, которая при наблюдении сбоку должна иметь форму приплюснутого шара или чечевицы. Однако последняя серия опытов с фото-, кино- и видеосъемкой

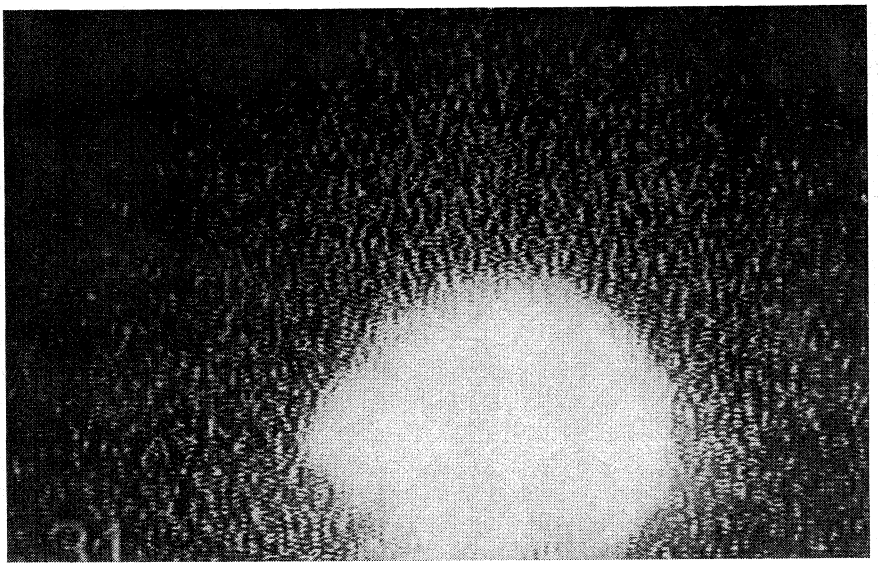

Рис. 5. Фотография лабораторного аналога шаровой молнии в опыте № 2 9.04.96.

показала, что форма светящегося устойчивого образования близка к шарообразной. Это можно объяснить следующим образом. Яркий шар – это область, в которой выполняются условия закольцовки электромагнитных волн видимой части спектра и закольцовки движущихся заряженных частиц КДФ. Вне этой области напряженность магнитного поля уже недостаточна, чтобы частицы КДФ с уменьшенным зарядом двигались по круговым орбитам. И из этой области происходит их утечка. На цветной фотографии граница шара достаточно четкая. К сожалению, черно-белая репродукция (рис. 4) передает очень мало информации, имеющейся на цветной фотографии.

Визуально эксперимент воспринимается следующим образом. В первый момент возникает яркая вспышка. Она видится как ослепительный шар диаметром около метра. Этот шар быстро гаснет, и в связи с тем что скорость адаптации глаза невелика, далее что-нибудь увидеть не представляется возможным. Поскольку устойчивое светящееся образование формируется внутри этого ослепительного шара, наблюдать его не удается. Однако, если загородить область над "плазменной пушкой" до высоты около метра непрозрачным экраном, то удастся увидеть эволюцию светящегося образования. Из-за экрана появляется ослепительный шар диаметром 30–35 см. Этот шар гладкий, совершенно непрозрачный и кажется жидким, а не газообразным. Цвет шара золотисто-желтый, похожий на цвет солнца или яичного желтка. По поверхности шара беспорядочно "бегают" более темные пятна с фиолетовым отливом неправильной быстроменяющейся формы.

Шар окружен сравнительно прозрачной оболочкой серо-фиолетового цвета, имеющей гладкую наружную поверхность. Оболочка пронизывается темными точками, хаотично движущимися внутри нее. Шар движется вверх со скоростью порядка метра в секунду. На некоторой высоте шар пропадает и вместо него возникает дымный тор белого цвета, который доходит до потолка лаборатории, останавливается и, медленно увеличиваясь в размерах, через несколько секунд распадается, образуя под потолком дымный слой толщиной 30–40 см с гладкой плоской нижней поверхностью.

В соответствии с расчетом [7] внутри светящегося шара закольцованы лучи с длиной волны λ, большей некоторого предельного значения $\lambda > \lambda_{пред}$. Величина $\lambda_{пред}$ есть функция градиента электронной концентрации и радиуса шара. Чем больше радиус, тем меньше $\lambda_{пред}$. Поэтому, чем меньше радиус, тем краснее должна быть ШМ, и, наоборот, большие молнии имеют цвет, сдвинутый в сторону зеленых и синих лучей. Это хорошо согласуется с литературными данными [10]. На последних стадиях существования шаровая молния может стать инфракрасной, т.е. невидимой для глаза (темной), что подтверждается результатами видеозаписей развития и исчезновения аналога шаровой молнии. После вишнево-красного шар становится темным.

На рис. 5 приведена фотография лабораторного аналога шаровой молнии, являющаяся копией изображения, полученного в цветной записи на видеокамеру Panasonic AG-455ME через некоторое время после того, как подвод электрической энергии к плазменному образованию уже прекратился.

Сравнение параметров шаровой молнии и ее лабораторного аналога

№	Параметр	Шаровая молния	Лабораторный аналог ШМ
1	вероятность сферической формы	$89 \pm 1\%$	Близкая к сферической
2	диаметр	28 ± 4 см	30–35 см
3	время жизни	$10^{0.95 \pm 0.25}$ с	около 2 с
4	скорость перемещения	4 ± 1 м/с	около 1 м/с
5	энергия	$10^{1.3 \pm 0.2}$ кДж	10 кДж
6	плотность энергии	$10^{0.75 \pm 0.5}$ Дж см$^{-3}$	0.8 Дж см$^{-3}$
7	цвет	Белый ($24 \pm 2\%$), желтый ($24 \pm 2\%$), красный ($18 \pm 2\%$), оранжевый ($14 \pm 2\%$), голубой и фиолетовый ($12 \pm 1\%$) и др.	от бело-желтого до темно-красного
8	распад	В $50 \pm 20\%$ случаев конец существования ШМ связан со взрывом, в остальных случаях – с медленным погасанием или распадом на части.	В 10% опытов – с увеличением светимости; остальные – с угасанием

Приблизительно в 10% опытов "жизнь" аналога ШМ заканчивается всплеском светимости (см. рис. 1). Это можно объяснить внезапным нарушением условий закольцовки электромагнитного поля. Одна из возможных причин – нарушение шаровой формы, например, при встрече с препятствием. Отметим, однако, что вспышка может возникнуть и спонтанно. В настоящее время характер гибели модели ШМ (со вспышкой и без нее) в опытах непредсказуем.

В таблице содержатся сравнительные характеристики лабораторного аналога шаровой молнии со среднестатистическими параметрами шаровой молнии, взятыми из книги Б.М. Смирнова [11].

Из таблицы видно, что параметры светящихся плазменных образований в основном укладываются в диапазон разброса свойств естественной шаровой молнии. Это позволяет рассматривать полученные объекты как лабораторный аналог шаровой молнии.

Работа выполнена в рамках программы "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки" (проект № 144).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаровая молния в лаборатории / Под ред. Авраменко Р.Ф. М.: Химия, 1994.
2. *Кунин В.Н., Залазаев П.М., Градусов Б.Ф. и др.* В сб.: Вопросы низкотемпературной плазмы и магнитогидродинамики. Рязань: РРТИ, 1978. С. 3.
3. *Кунин В.Н., Фуров Л.В.* Исследование плазменных тороидальных вихрей, возникающих при электрическом взрыве диафрагмы в воздухе // Изв. вузов. Физика. 1990. № 6. С. 119.
4. *Кунин В.Н., Дорожков В.В., Сергеева М.В.* Инерционный копровый накопитель для получения электрических импульсов высоких энергий // ПТЭ. 1981. № 3. С. 199.
5. *Кунин В.Н., Конопасов Н.Г., Плешивцев В.С.* Индукционный накопитель электрической энергии // ПТЭ. 1988. № 3. С. 103.
6. *Кунин В.Н.* Оптические свойства устойчивого тороидального плазменного вихря (оптическая модель шаровой молнии). Владимир, 1983. 11 с. – Деп. в ВИНИТИ 17.05.83, № 4543.
7. *Kunin V.N., Furow L.V.* Investigation of Metastable Toroidal Plasma Vortices. European Interdisciplinary Congress of Ball Lightning "Vizotum'93". Salzburg. Austria. Sept. 20–22. 1993. P. 50.
8. *Кунин В.Н., Мельникова Т.В., Фуров Л.В.* Рефракция оптического излучения на электронной компоненте плазменного тороидального вихря // Изв. вузов. Физика. 1996. № 6. С. 124.
9. *Кунин В.Н., Кондаков В.П., Фуров Л.В.* Регистрация поляризованности оптического излучения плазменного тороидального вихря. Владимир, 1990. 11 с. – Деп. в ВИНИТИ 10.01.90, № 638.
10. *Барри Дж.* Шаровая молния и четочные молнии. М.: Мир, 1983.
11. *Смирнов Б.М.* Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988.