

04;07;12

Экспериментальное моделирование долгоживущих светящихся образований на основе полимерных органических материалов

© В.Л. Бычков, А.В. Бычков, И.Б. Тимофеев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия
e-mail: bychvl@orc.ru

(Поступило в Редакцию 23 июня 2003 г.)

Проведены эксперименты по созданию плазменных струй из капилляров, изготовленных из полимерных материалов, таких как воск, молотая древесина, канифоль, и их смесей. При помощи плазменной струи было произведено поджигание паров воска. При этом наблюдалось всплывание горящих областей паров воска эллипсоидального типа размером до 10–15 см при времени их горения до 0.4 с. В экспериментах были также созданы долгоживущие светящиеся образования (ДСО) с временем жизни до 1.5 с и видимым размером до 1.5 см. Проведена сканирующая электронная микроскопия остатков ДСО, позволяющая заключить, что основой структуры данных материалов являются полимерные волокна. Полученные экспериментальные результаты позволяют предположить, что некоторые природные шаровые молнии имеют органическую основу.

Введение

Получение искусственных шаровых молний или долгоживущих светящихся образований (ДСО) [1], теоретический анализ полимерных шаровых молний и их связь со светящимися объектами — шарами в газоразрядных экспериментах [2–4] поставили вопросы о возможной полимерной природе ДСО и показали необходимость проведения экспериментов [4–6] по проверке теорий и гипотез [4–6]. Согласно теории [3] и гипотезам [2,4], шаровые молнии и шары в газоразрядных экспериментах с присутствием в объеме органических паров или макромолекулярных компонентов (в частности, компонентов древесины [2]) представляют собой структуры с полимерным каркасом, образованные в разряде в результате плазмохимических процессов с участием макромолекул, частичек пыли или кремнезема. В силу диэлектрической и полимерной природы процессы рекомбинации накопленных зарядов в них достаточно длительны и устойчивое состояние этих объектов определяется их нагревом окружающей плазмой до температуры, при которой происходит разрушение объекта или его возгорание.

Данная работа является логическим продолжением и развитием работ [5–7] по ДСО полимерному плазмиду и по получению ДСО на основе микрофрагментов ваты и частичек угля при использовании эрозионных разрядов, а также развитием работы [8] по исследованию воздействия плазменных струй на различные материалы.

Постановка экспериментов

Цель создания ДСО с полимерной основой определила и выбор органических материалов для изготовления капилляра разрядных камер. Эксперименты проводились с использованием капиллярного плазмотрона, типичного

для таких экспериментов, подробно описанного в работе [1]. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

Она представляет собой цепь, включающую в себя емкостной накопитель энергии I , коммутирующий элемент — разрядник 2 и капиллярный плазмотрон 3 . Характеристики разрядного контура следующие: длительность импульса тока 6 ms, энергия в импульсе 200 J, напряжение на разрядном промежутке 300–340 V, максимальное значение тока в импульсе 100–150 A.

Вольт-амперные характеристики этого плазмотрона с капилляром из оргстекла и смеси канифоли, парафина и молотой древесины показали, что импульс тока и напряжения по времени имеют стандартную [1] для эрозионных плазмотронов колоколообразную форму. При использовании капилляра из оргстекла длительность разрядного импульса была меньше на время $\tau \sim 1.5$ ms, чем в случае смеси.

Значения сопротивлений делителя напряжения, используемого для снятия зависимости напряжения на разрядном промежутке от времени: R_1 — 62 k Ω ,

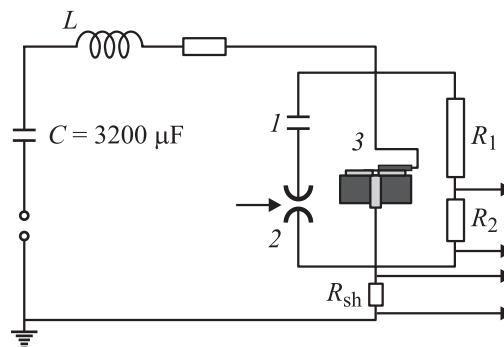


Рис. 1. Общая схема разрядного контура: I — емкостной накопитель энергии; 2 — разрядник; 3 — капиллярный плазмотрон; R_1, R_2 — сопротивления делителя напряжения; R_{sh} — токовый шунт.

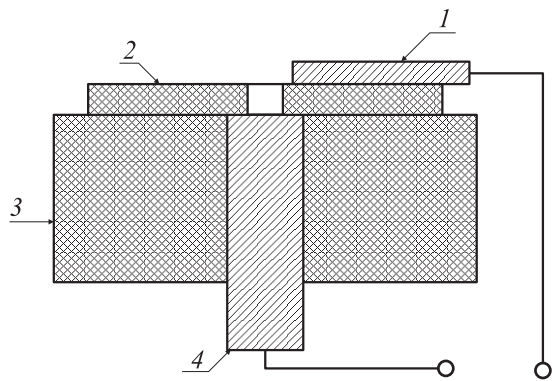


Рис. 2. Эрозионный плазмотрон: 1, 4 — электроды; 2 — диэлектрическая пластина с капилляром (разрядная камера); 3 — станина плазмотрона.

R_2 — 1.2 kΩ. Сопротивление шунта $R_{sh} = 0.013 \Omega$. Общая емкость накопителя $C = 3200 \mu F$.

Для получения разряда использовался капилляр (рис. 2) из различных полимерных материалов диаметром 1–2 мм и длиной 3–4 мм. Нижний электрод (4 на рис. 2) был выполнен из сплава вольфрама с медью (ВДПМ), верхний электрод был медным, остальные элементы конструкции плазмотрона (за исключением капилляра) были выполнены из оргстекла.

Запуск плазмотрона и регистрирующего осциллографа осуществлялся синхроимпульсами, поступающими с генератора импульсов Г5-15.

Фотосъемка разряда осуществлялась в интегральном режиме при открытой диафрагме с использованием нейтральных фильтров. Видеосъемка проводилась в непрерывном режиме видеокамерами с продолжительностью кадров 33 и 41 ms. Осциллограммы тока на межэлектродном зазоре регистрировались с помощью омического шунта с сопротивлением 0.013 Ω.

Плазма создавалась с использованием капилляров из оргстекла (ПММА), парафина, смеси воска и канифоли, а также смеси парафина с канифолью и молотой древесины (размер частиц 100–300 μm) (составом 1 : 1 : 3 объемных частей). При использовании различных плазмообразующих материалов для капилляров внешние области плазмы (вне капилляра) отличались друг от друга по виду и размеру.

Характерная длина светящейся области составляла 10–12 мм для всех типов капилляров, видимый диаметр струи при использовании ПММА составлял 3–5 мм, а в случае использования капилляров из других материалов увеличивался до 15–40 мм.

Эксперименты с использованием капиллярного плазмотрона

Получение светящихся шаров. Схема экспериментов с использованием капиллярного плазмотрона представлена на рис. 3. В кювете 2 воск доводился

до кипения, после чего кювета помещалась на расстоянии 1–2 см от среза сопла плазмотрона.

На рис. 4 представлено горение легкой фракции паров воска в результате взаимодействия с плазменной струей. В этом случае плазменная струя формировалась при помощи капилляра из ПММА (длиной 3 мм и диаметром 1 мм). После воспламенения происходит подъем горячей области — ДСО на высоту 15–20 см с полным отделением горячей области от поверхности кюветы. Данный процесс длился до $t \approx 0.4$ s. Характерное время и высота всплывания светящейся области позволяют оценить температуру газа, находящуюся в нем, которая оказывается порядка $T \approx 2000$ К. Это указывает на полное сгорание паров парафина [9]. Предполагая, что при нагревании парафина происходит его разложение до метана, можно оценить соотношение молекулярных компонентов над поверхностью нагретого парафина: $CH_4 : O_2 : N_2 \approx 1 : 1 : 8$.

Результаты данного эксперимента заслуживают внимания, так как подобные светящиеся шары с временем жизни $t < 1$ s неоднократно наблюдались в естественных условиях, а именно в лесах во время гроз в жаркую погоду [10]. В этом случае внешние факторы, такие как высокая температура и отсутствие ветра, могли приводить к

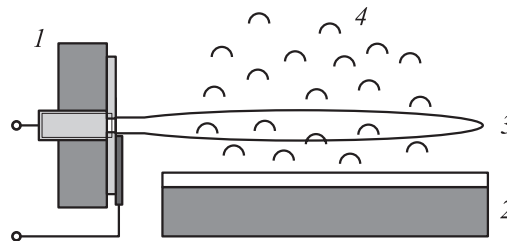


Рис. 3. Схема эксперимента с использованием эрозионного плазмотрона: 1 — плазмотрон, 2 — кювета с расплавленным воском, 3 — плазма, 4 — пары воска.

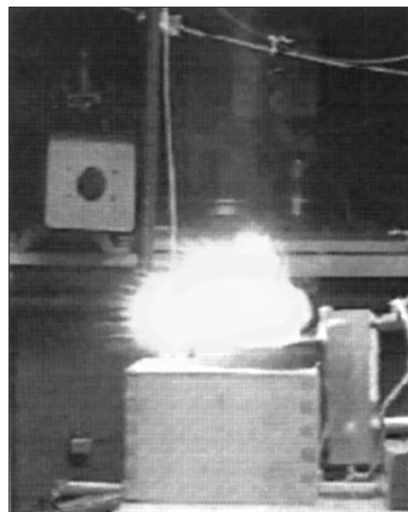


Рис. 4. Горение легкой фракции паров воска в результате взаимодействия с плазменной струей. Плазмотрон находится справа от ДСО.

локальному повышенному содержанию органических паров в воздухе у поверхности земли. Поскольку скорость диффузии органических полимерных частиц, из которых состоят эти пары, в воздухе значительно ниже, чем у молекул кислорода и азота ($D_{\text{орг}} \sim D_{\text{O}_2} (M_{\text{O}_2}/M_{\text{пол}})^{0.5}$), то могло происходить их локальное накопление возле источника (например, выделяющего их дерева). Поэтому данный эксперимент по существу моделировал процесс возгорания паров при взаимодействии с разрядом линейной молнии с последующим всплыванием горячей области. Его результаты объясняют природу образования таких шаров.

Получение ДСО с полимерной структурой. При помощи капиллярного плазмотрона были проведены эксперименты, направленные на создание ДСО, характеристики которых как можно лучше соответствовали бы характеристикам шаровых молний (ШМ), наблюдаемых в природе, а именно время жизни от $t \sim 1$ с и более при размере 1 см и более.

Эксперименты, в результате которых были получены ДСО, проводились по двум схемам. Первая схема представлена на рис. 3. Вторая схема отличается от первой тем, что в ней отсутствует кювета, создающая пары воска. На формирование ДСО наличие или отсутствие горячих паров заметного влияния не оказывало.

На рис. 5, *a-d* представлены типичные ДСО, создаваемые в ходе данной серии экспериментов. Последовательность снимков сделана при помощи видеокамеры с продолжительностью одного кадра $t = 41$ ms. По количеству кадров можно было оценить время жизни создаваемых ДСО. На рис. 5 представлена последовательность кадров: 1–3 и 13 при общем количестве кадров 29 и с полным временем жизни ДСО $t \sim 1.2$ s, кадр 0 соответствует импульсу разряда, он, как правило, бывает засвеченным. Следует отметить, что при данной энергетике появление ДСО из канала плазмотрона происходит, как правило, через $t \sim 40$ – 45 ms после окончания импульса энерговклада. Другим важным следствием анализа видеофильма оказалось, что глаз не воспринимает малые размеры ДСО при его погасании. В данном случае время наблюдения жизни ДСО было $t \sim 1$ s.

Главным условием появления ДСО в ходе данной серии экспериментов являлся определенный выбор компонентов смеси, из которых изготавливались разрядные камеры (капилляры). Размеры капилляра оставались прежними: 3–3.5 мм в длину и диаметром 1 мм.

Следует отметить, что к появлению ДСО в данной серии экспериментов привел только один набор компонентов, состоящий из чистого медицинского парафина (П), канифоли (К) и молотой древесины (Д) со средним размером „зерна“ $1 \times 0.3 \times 0.3$ мм. При этом объемные пропорции смеси при изготовлении капилляра следующие: П:К:Д = 1:1:3 соответственно. В наших экспериментах использовалась древесина сосны. На основании работ [2] был сделан вывод о предпочтительности использования именно этой породы древесины в силу содержания в ней большого количества лигнина, поскольку предполагалось, что при воздействии плазмы

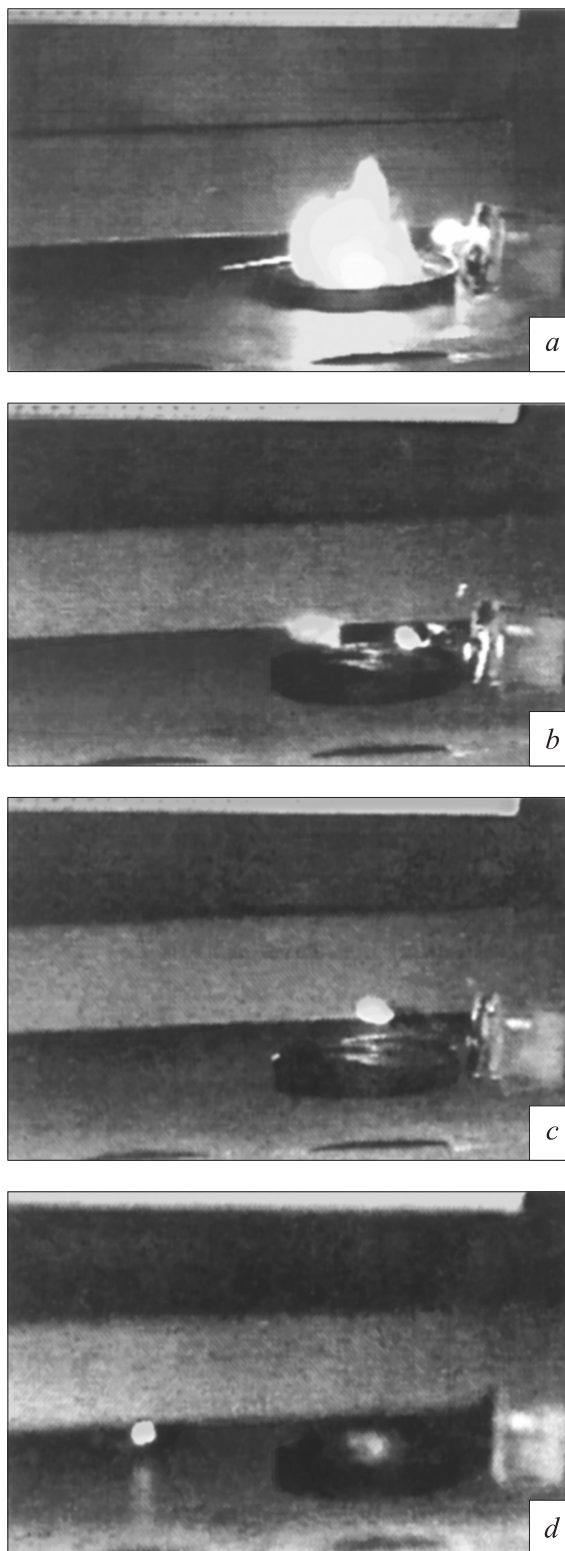


Рис. 5. Временная динамика полимерных ДСО, создаваемых с помощью капиллярного плазмотрона: *a* — ~ 41 ms — формирование ДСО, *b* — ДСО через ~ 82 ms, *c* — ДСО через ~ 123 ms, *d* — ДСО через ~ 533 ms.

на лигнин возможны процессы полимеризации новой структуры.

При проведении экспериментов появление ДСО фиксировалось, как правило, в трех случаях из четырех. При многократном использовании одного капилляра нельзя было предсказать возможность появления ДСО в результате каждого последующего разрядного импульса, но появление ДСО неоднократно наблюдалось и через 20 и 30 разрядов, при этом диаметр капилляра мог достигать 2–2.5 мм. При условии не очень частых разрядов (1 разряд в 5 s) капилляр сохранял свой первоначальный диаметр $d = 1$ мм в ходе первых 5–7 пусков плазмотрона.

Напомним, что появление ДСО происходило с типичной временной задержкой $t \sim 40$ ms по отношению к разрядному импульсу, что легко оценивалось при помощи видеосъемки. Оценить энергию, вложенную в капилляр в течение времени после импульса тока до появления ДСО из канала, не удалось, в связи с конструктивными особенностями генератора. Тем не менее о том, что в это время происходит выделение энергии в канале, говорит достаточно высокая начальная скорость ДСО (3–5 м/с), что позволяет оценить энергию в канале капилляра $E < \sim 0.4\text{--}0.6$ J.

Практически все наблюдаемые ДСО на протяжении времени своего существования совершали неоднократные соударения с поверхностью экспериментальной установки, покрытой черной бумагой. При расшифровке видеозаписи было видно, что ДСО испытывали почти абсолютно упругие соударения. Скорость вылета ДСО из капилляра, определенная по видеозаписи, составляла от 3 до 5 м/с. Некоторые из наблюдавшихся ДСО постепенно уменьшались в размере с 5–7 мм, в диаметре — до 2–3 мм. Иногда при кадровом анализе видеосъемки было видно, что крупные ДСО распадаются на более мелкие. Исчезали ДСО, как правило, внезапно, при очередном соприкосновении с поверхностью установки или в полете.

В нескольких случаях после погасания ДСО на поверхности можно было обнаружить остатки его структуры, которые представляли собой частицы черного цвета величиной до 2 мм. Данные остатки исследовались с помощью электронного микроскопа SCAN-240-Cambridge при различном увеличении. На рис. 6 представлен ряд наиболее интересных снимков, полученных с помощью этого электронного микроскопа.

Также при помощи электронного микроскопа был исследован материал, из которого изготавливались разрядные камеры (капилляры). На рис. 7 представлены увеличенные фрагменты исходного материала. Они представляют собой непрерывные полимерные образования с различными вкраплениями. На отдельных снимках отчетливо видны структуры в форме крупных нитей или в виде волокон толщиной до 20 мкм. Гладкие поверхности соответствуют, скорее всего, расплавленным компонентам парафина или канифоли.

На рис. 6 представлены увеличенные фрагменты остатков ДСО. По сравнению с исходным материалом

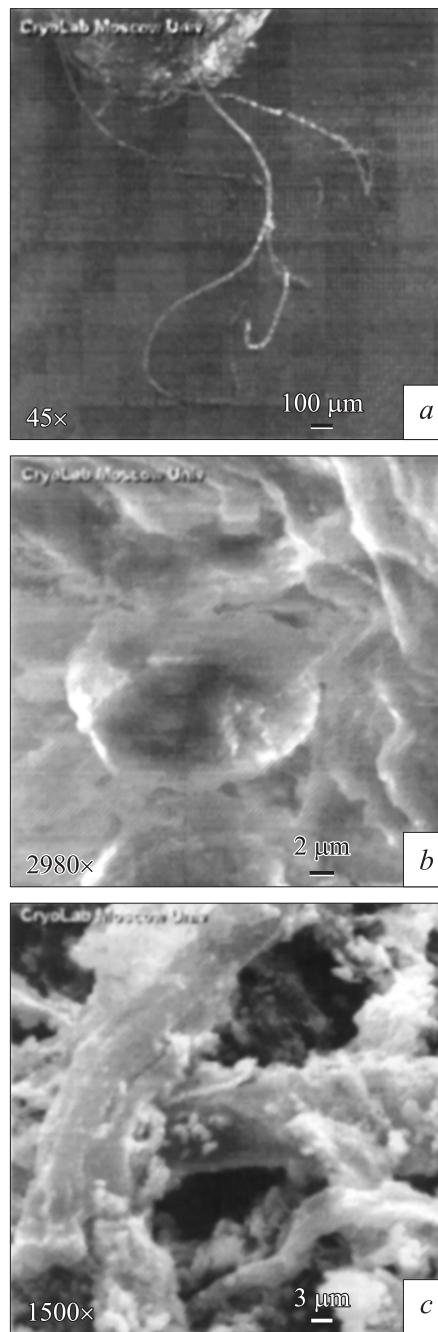


Рис. 6. *a–c* — увеличенные фрагменты остатков полимерных ДСО.

(рис. 7) мы видим практически полное исчезновение поверхностей гладкого материала. Все поверхности при увеличении до 2 мкм представляют собой пористые материалы, состоящие из переплетенных нитей с отчетливо различимыми кластерами между ними. Можно предположить, что в процессе существования произошло сгорание материала парафина или канифоли, что привело к визуализации внутренней структуры ДСО, состоящей из целлюлозы и лигнина (компонентов молотой древесины).

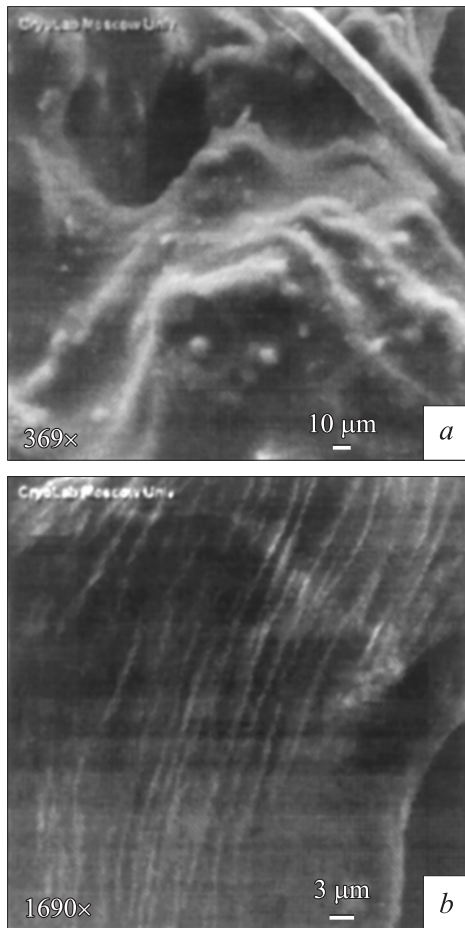


Рис. 7. *a, b* — увеличенные фрагменты материала, использованного для изготовления капилляров.

Природой таких ДСО может служить сгорание крупных полимерных кластеров, появляющихся в канале за счет полимеризации материала стенок или за счет отрыва фрагментов в капилляре и их объединения в кластеры внутри канала. В этом случае прогрев поверхности частиц может приводить к образованию горячей пленки, отходящих от их поверхности газов. Величина фронта пламени для полимерных материалов естественного происхождения, как показано теоретически на основе решения уравнения теплопроводности для тонких образцов и экспериментально в работе [11], достигает нескольких (5–8) диаметров образца. Для времени жизни органического объекта при плазменной стадии его сгорания [11] $t \sim 1.5d^2, s$ (d, mm). Подставляя $d \sim 1–2 mm$ (толщина полимерного кластера ограничена диаметром канала плазмотрона $\sim 1–2 mm$), получим, что теоретическое время жизни светящегося объекта $t \sim 1.5–6 s$, а его видимый диаметр $D \sim 5–16 mm$. Это соответствует проведенным в экспериментах наблюдениям.

Исходя из закона Архимеда, можно показать, что кластеры с плотностью материалов ели, сосны или

березы (которые близки по параметрам нашей смеси с $\rho \sim 0.3–0.5 \cdot 10^3 kg/m^3$) с видимым диаметром 10–16 mm, ограничивающим нагретую зону с температурой пламени $T_f = 1400–1500 K$, типичной для горения полимерных материалов, могут парить под действием выталкивающей силы холодного воздуха, действующей на область, занимаемую светящимся объектом.

Таким образом, можно предположить, что одним из типов естественных шаровых молний с временем жизни $t \sim 1.5–6 s$ и диаметром до 3–4 cm могут являться полимерные горящие частицы, образованные при ударе линейных молний в деревья. При этом фронт пламени, по размеру значительно больший, чем размер частиц, будет восприниматься наблюдателями как эффективный размер ШМ. В то же время фронт пламени будет определять способность частиц к левитации за счет архимедовой силы.

Полученные нами результаты позволяют предположить, что в экспериментах [12,13] наблюдались ДСО также органического происхождения, появившиеся при замыкании электродов, покрытых кусочками обугленной древесины [12], или при разряде с высоковольтного электрода генератора Теслы, покрытого кусочками обугленной древесины или воска [13].

Выводы

При помощи капиллярного плазмотрона были проведены эксперименты по созданию плазменных струй из капилляров, изготовленных на основе полимерных материалов, таких как воск, парафин, молотая древесина, канифоль и их смеси. При инъекции плазменной струи было произведено поджигание паров воска. По скорости всплывания горящих областей паров воска (эллипсоидального типа размером $D \sim 10–15 cm$ и при времени горения до $t \sim 0.4 s$) была оценена их температура, которая составила $T \sim 2000 K$.

В экспериментах были также созданы ДСО с временем жизни до 1.5 s и видимым размером до 1.5 cm. В ходе экспериментов был подобран оптимальный набор компонентов капилляра (парафин, канифоль, молотая древесина), позволяющий создавать ДСО. Проведена сканирующая электронная микроскопия остатков ДСО и материала капилляра, из которого формировались ДСО. Проведен первичный анализ фотографий увеличенных фрагментов этих материалов, позволяющий предположить, что основой структуры данных материалов являются полимерные волокна.

Некоторые виды шаровых молний, наблюдающиеся в природе, могут иметь органическую основу — представлять собой горящие области тяжелых органических паров, или светящиеся структуры с полимерным каркасом.

Список литературы

- [1] Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачевая Л.П. // Сб. ст. / Под ред. Р.Ф. Авраменко и др. М.: Химия, 1994. С. 15–56.
- [2] Слюсарев Н.М. // Шаровая молния / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: ИВТАН, 1990. С. 18–29.
- [3] Bychkov V.L., Bychkov A.V., Stadnik S.A. // Physica Scripta. 1996. Vol. 53. P. 749–759.
- [4] Bychkov V.L. // Physica Scripta. 1994. Vol. 51. P. 119–126.
- [5] Емелин С.Е., Семенов В.С., Эйхвальд А.И., Хассани А.К. // Сб. ст. / Под ред. Р.Ф. Авраменко и др. М.: Химия, 1994. С. 87–95.
- [6] Emelin S.E., Semenov V.S., Bychlov V.L., Belisheva N.K. et al. // Tech. Phys. 1997. Vol. 42. P. 269–277.
- [7] Бычков В.Л., Гридин А.Ф., Климов А.И. // ТВТ. 1994. Т. 32. № 2. С. 190–194.
- [8] Ершов А.П., Розанов В.В., Сысоев Н.Н., Тимофеев И.Б. и др. Препринт МГУ. № 8/1994. М., 1994. 34 с.
- [9] Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 200 с.
- [10] Taylor A.R. // Yearbook of Science and Technology. McGraw-Hill, 1974. P. 201–203.
- [11] Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 170 с.
- [12] Ford R.A. Homemade Lightning. New York; Chicago: McGraw-Hill, 2001. P. 227–229.
- [13] Корум К.Л., Корум Дж.Ф. // УФН. Т. 160. № 4. С. 47–58.