

03;04

Исследование свойств эрозионного разряда в газодисперсном потоке

© В.А. Битюрин, В.Ю. Великодный, И.А. Самуолис

Объединенный Институт высоких температур РАН, Москва
Институт прикладной механики РАН, Москва
E-mail: dolgonosiki@gmail.com

Поступило в Редакцию 5 апреля 2009 г.

Проведены экспериментальные исследования эрозионного разряда в потоке газодисперсной смеси (воздух + микрокапли электролита). Для получения продуктов эрозии на электроды наносился воск (ранее такой методикой пользовался Н. Тесла). В результате за разрядным промежутком реализовывались два режима: линейный пробой в виде „четочной“ молнии (промежуток 0.5–1 м) и появление долгоживущих плазменных образований. Проведен анализ ватообразных образований из воска, после соскобов материала эрозии со стенок предметных стекол, с использованием оптических микроскопов разного увеличения. На основе киноматериалов о полете долгоживущих образований в магнитном поле и осциллограмм тока, полученных с проводящего экрана, была создана непротиворечивая физическая модель, описывающая процессы рождения, жизни и гибели долгоживущих плазменных образований.

PACS: 52.80.-s

Еще в экспериментальных работах Н. Тесла [1] было отмечено, что плазма, содержащая продукты эрозии электродов или продукты конденсации от специально испаряемой восковой подложки, обладает рядом уникальных свойств. В частности, отмечалось значительное время жизни (0.1–1 s) этих плазменных образований (см. [2]). Впоследствии эти результаты были неоднократно повторены в большом количестве экспериментальных (см. [3–5]) и теоретических (см. [6–8]) работ, где наряду с долгими временами жизни отмечались и другие интересные особенности, например: расщепление фронта ударной волны, реализация больших потенциалов во фронте, значительное разделение зарядов при взаимодействии этих плазменных образований с ударными волнами и т.д.

Для получения плазменных образований нами была использована идея эрозионного разряда, впервые реализованная в работах Тесла (см. [1]). В качестве эрозионного материала использовался биологический полимер. Для этого один из электродов — анод частично смазывался воском. Воск также служил защитой электрода (его металлической части) от интенсивной эрозии металла.

В отличие от предшественников [3–5] в качестве рабочей среды использовался поток воздуха и мелкодисперсных (подробнее см. [8,9]) капель электролита с высокой концентрацией поваренной соли (40 g NaCl на литр H₂O). Значительным результатом стал пробой в виде „четочной“ молнии во внеэлектродной зоне на расстояниях ~ 1 m при малых напряжениях в электродной зоне 600–800 V и возможность получать с высокой вероятностью долгоживущие плазменные образования. В сухом воздухе пробой в таком промежутке соответствует разности потенциалов $0.5 \cdot 10^6$ – 10^6 V.

Установка для представленного эксперимента состоит из нескольких частей (рис. 1). В балластную емкость объемом 480 литров (3) под давлением в 8–10 атмосфер накачивается газ (в данной работе — воздух). Часть потока электролита подается (5) в закритическую часть сопла Лавая (4), где смешивается со сверхзвуковым потоком воздуха. Вторая часть потока электролита насыщается пузырьками воздуха в барботере (14) (образуется пористый электролит) и подается в разрядный промежуток. Для этого один из электродов — катод (6) выполнен из медной трубки с отверстиями (7), направленными в сторону второго электрода — анода (10). На поверхность анода перед каждым экспериментом наносится тонкий (~ 0.1 mm) слой воска (внешний размер камеры с электродами 120 × 50 × 35 mm, толщина стенок 10 mm). Пористый электролит (подробнее см. [10,11]) готовится в барботажной секции (14). Барботажная секция — это камера, в которую подается воздух (16) через мембрану с микроскопическими отверстиями ($d \sim 100 \mu\text{m}$) и смешивается с электролитом (15), образуя пористый электролит (пузырьковая смесь с высоким объемным газосодержанием $\varphi \sim 0.3$ – 0.92 (14)). Отметим, что обычно при течении пузырьковой смеси в каналах при $\varphi > 0.3$ происходит переход из пузырькового режима течения в поршневой (см. [10]). Реализация пузырькового режима течения при $\varphi > 0.3$ является непростой инженерной задачей, которая была решена нами (см. [11]).

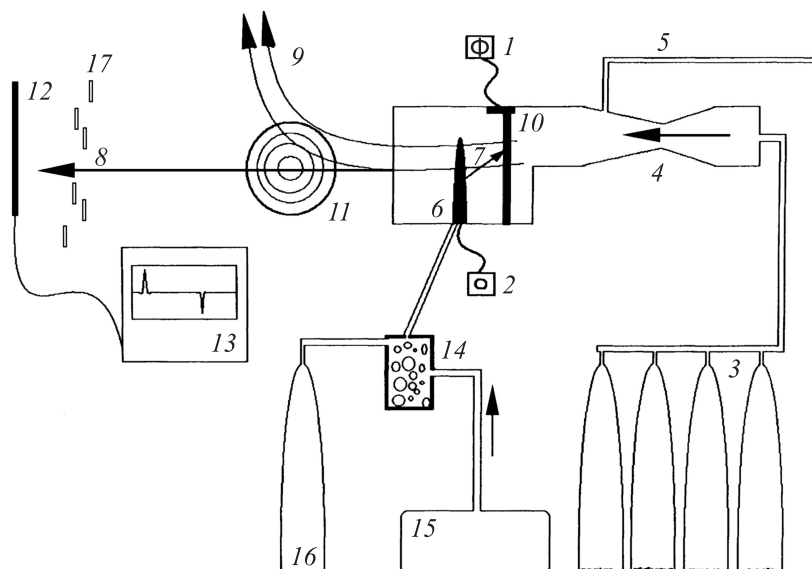


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 — подача напряжения на анод; 2 — подача напряжения на катод; 3 — балластная система подачи сжатого газа в рабочую часть канала; 4 — сопло Лавали; 5 — подача электролита в закритическую область сопла Лавали; 6 — электрод-катод (выполнен из медной трубочки с отверстиями, направленными в сторону другого электрода для замыкания пористым электролитом разрядного промежутка); 7 — поток пористого электролита замыкает разрядный промежуток, создаются необходимые условия для рождения объемно-диффузионного разряда; 8 — направление движения светящихся шаровых плазменных образований в отсутствие магнитного поля; 9 — отклонение от прямолинейного движения шаровых плазменных образований в присутствии сильного магнитного поля; 10 — электрод-анод с напылением из воска; 11 — постоянные магниты образуют сильное магнитное поле, отклоняющее заряженные образования; 12 — проводящий экран; 13 — осциллограф; 14 — барботажная система для создания пористого электролита; 15 — электролит; 16 — сжатый газ; 17 — предметные стекла.

Во время эксперимента открываются клапаны подачи воздуха и пористого электролита, а затем на электроды подается напряжение (расстояние между электродами ~ 1 см). После этого происходит соб-

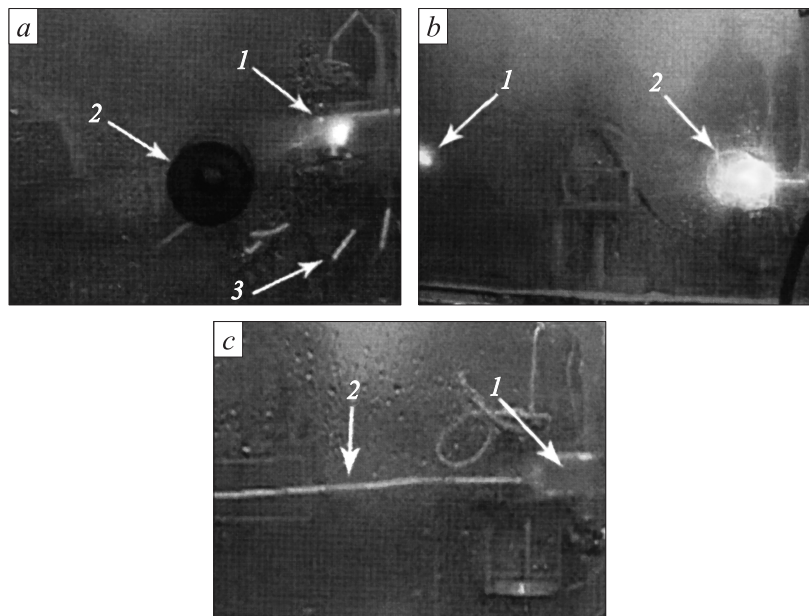


Рис. 2. *a* — искривление траекторий движения плазменных образований в присутствии магнитного поля: *1* — разряд в межэлектродном промежутке, *2* — постоянные магниты на стенках аквариума; *3* — плазменные образования в присутствии магнитного поля изменяют свои траектории; *b* — долгоживущее плазменное образование на значительном расстоянии от межэлектродного промежутка: *1* — разряд в межэлектродном промежутке, *2* — плазмод на расстоянии ~ 1 м от электродов; *c* — пробой в виде „четочной“ молнии: *1* — в межэлектродном промежутке нет разряда, *2* — несмотря на то что между электродами нет разряда, в окружающем пространстве организуется пробой в виде „четочной“ молнии.

ственно эксперимент. Производится кинофотосъемка, в непрерывном режиме снимаются осциллограммы с проводящего экрана, помещенного на значительном расстоянии от разрядного промежутка (~ 1 м).

В результате испарения воска с анода и последующей его конденсации в газочапельном потоке образуются ватообразные „клубки“ из биологического полимера (воска). Пористый электролит, истекающий

из барботера, замыкает цепь анод и катод. При замыкании цепи в межэлектродной зоне реализуется пробой типа линейного разряда. На рис. 2, *a* показано поведение заряженных образований и линий тока в присутствии сильного магнитного поля. Обычно от основной части разряда отделяется шаровой светящийся объект и начинает двигаться к заземленному корпусу установки или же в окружающее пространство. Скорость потока вне электродной зоны в данном случае относительно небольшая $\sim 5\text{--}8\text{ м/с}$. При исчезновении плазмоида образуется выброс, визуально похожий на запятую. Аналогичное явление при исчезновении долгоживущих плазменных образований наблюдалось и другими исследователями [3–5]. В одном из вариантов получались долгоживущие плазменные образования в виде шариков. В другом — пробой в виде „четочных“ молний (пробой с чередованием сегментов разного цвета). Режим „четочной“ матрицы реализовывался как при наличии линейного разряда, так и при его затухании. Пробой в виде „четочной“ молнии реализуется гораздо чаще, чем режим образования шаровых долгоживущих плазменных образований. Следует также отметить, что образование шаровых молний в природе также достаточно редкое явление, хотя в данном случае мы не претендуем на получение собственно шаровой молнии. В нашем случае примерно на 20–30 пробоев в виде „четочной“ молнии имеется примерно один случай получения шарового светящегося образования. На рис. 2, *b* показано, как шаровой светящийся объект находится на значительном ($\sim 1\text{ м}$) расстоянии от разрядного промежутка. На рис. 2, *c* представлена типичная фотография „четочной“ молнии. Экспериментально исследовалось взаимодействие плазменных образований в виде шаровых светящихся объектов и в виде „четочных“ молний с проводящим экраном, установленным в потоке газокапельной смеси на расстоянии 0.5–1 м. Сигнал с проводящего экрана (рис. 1, 12) поступал на осциллограф (рис. 1, 13). Типичная осциллограмма была представлена нами ранее в [5]. Первый сигнал имел положительную полярность, это соответствовало попаданию на проводящий экран положительных ионов; второй — отрицательную, это соответствовало попаданию на экран ватообразных образований или пробоем в виде „четочной“ молнии. Позже нами были проведены экспериментальные исследования воздействия магнитного поля на светящиеся образования. В отсутствие поля траектории плазменных объектов (при большой скорости потока) были практически прямолинейными (рис. 2, *b, c*), при наличии же поля траектории резко искривлялись (рис. 2, *a*). При этом

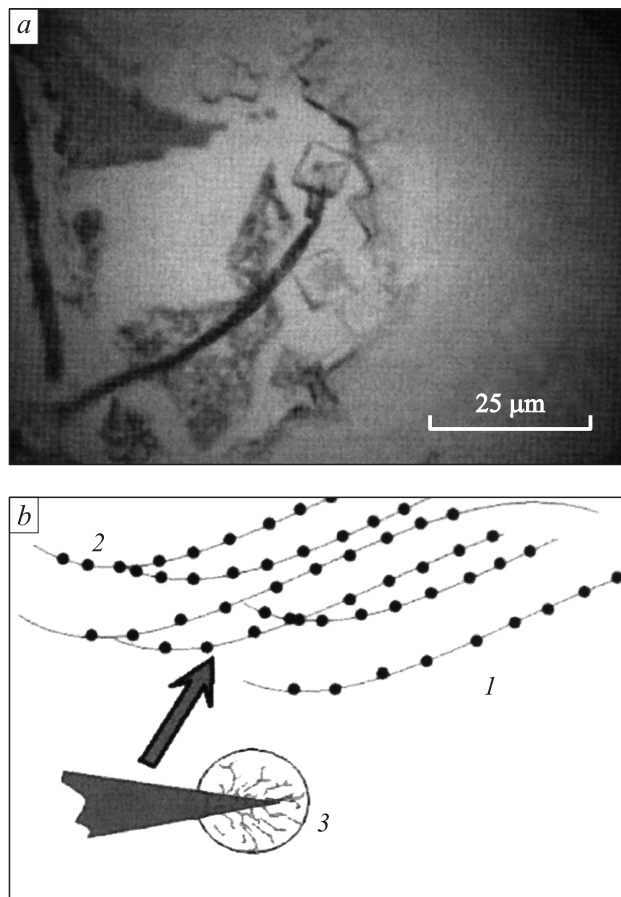


Рис. 3. *a* — восковые нити под микроскопом, *b* — физическая модель процесса. *1* — нити биологического полимера, *2* — осевшие электроны, *3* — коронный разряд на нитях полимера.

магнитное поле как бы выталкивало плазменные объекты и сильно изменяло их траектории. Это было вторым подтверждением наличия значительного нескомпенсированного заряда у макроскопических плаз-

менных образований наряду с результатами [5]. Также нами были взяты соскобы со стенок установки и предметных стекол, помещенных в поток (рис. 1, 17), и проведен их микроскопический анализ на оптических микроскопах разного увеличения — 150, 250, 4000. Толщина волосинок воска, осевших на стекла, была микронного и субмикронного размера (см. рис. 3, а).

На основании вышесказанного была предложена физическая модель процесса. Вследствие большей подвижности электроны прилипают к „тяжелым“ макроскопическим восковым образованиям. Положительные же ионы уносятся потоком. Получается макроскопическое пространственное разделение заряда. В обычной плазме такое просто невозможно при приемлемых энергетических затратах, так как плазма квазинейтральна на расстояниях больше дебаевского радиуса. Аналогичные процессы разделения компонентов смеси и заряда (но в меньших пространственных масштабах) реализуются и в ударных волнах [4–9].

Свечение шаровых плазменных образований можно объяснить наличием значительного нескомпенсированного заряда, находящегося на волосинках полимера, и малостью радиуса кривизны волосинок. Возникает некое подобие коронного разряда на каждой волосинке. Однако из-за большого количества волосинок в ватообразном объекте создается впечатление как бы светящегося объекта. Физическая модель процесса иллюстрируется на рис. 3, б.

1. В работе получены долгоживущие плазменные образования в высокоскоростном потоке гетерогенной среды (воздух + микрокапли электролита), реализован пробой большого промежутка при относительно малом потенциале (в виде „четочной“ молнии).

2. Получено доказательство существования большого нескомпенсированного заряда у долгоживущих плазменных образований путем исследования траекторий их движения в магнитном поле и без него.

3. Исследована структура ватообразных образований из испаряемого с поверхности электродов воска и его конденсации в газокапельной среде.

4. На основе результатов анализа структуры ватообразных восковых образований и доказательства существования у них большого не скомпенсированного заряда предложена физическая модель таких долгоживущих плазменных образований.

Список литературы

- [1] *Tesla N.* Colorado-Springs Notes: 1899–1900 / Ed. A. Marincic. Belgrade: Nolit, 1978.
- [2] *Fire Ball in a Laboratory* // Collection of Papers. Ed. By R. Avramenko, A. Klimov. M.: Chemistry, 1994. 256 p.
- [3] *Климов А.И.* // Химическая физика. 2006. Т. 25. № 3. С. 104–109.
- [4] *Klimov A., Bityurin V., Charitonov A., Fokeev V., Sakharov A., Yustavkin N., Kuznetsov A.* // Paper AIAA. 2002-0639. 40 th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 14–17 January, 2002. Reno. 8 p.
- [5] *Bityurin V.A., Velikodnyi V.Yu., Samuolis I.A., Kolesnikov E.B., Popov V.V.* // The 7th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Moscow, 17–19 April 2007. P. 207–214.
- [6] *Velikodny V.Yu., Bityurin V.A.* // Propective on 2nd Workshop on Magneto- and Plasma- Aerodynamics for Aerospace Application. IVTAN, Mascow, April 5–7, 2000. P. 301–306.
- [7] *Великодный В.Ю., Битюрин В.А.* // Прикладная физика. 2002. № 5. С. 90–98.
- [8] *Lineberry J.T., Velikodnyi V.Yu., Bityurin V.A.* // AIAA. 2001-0638. 39 th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 8–11 January, 2001. Reno, Nevada. 6 p.
- [9] *Башлыков А.М., Великодный В.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 5. С. 24–28.
- [10] *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
- [11] *Бушманов Е.А., Великодный В.Ю., Воротилин В.П., Яновский Ю.Г., Тимофеев И.Б., Д. Ван Ви.* // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 49–55.