

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Б. П. КОНСТАНТИНОВА

Препринт

А.И. Егоров, С.И. Степанов

**Свойства шаровых плазмоедов, возникающих после  
электрического разряда во влажном воздухе**

Гатчина – 2004

УДК 533.9.07, 551.594.2

**Characteristics of spherical plasmoids originated after electric discharge  
in humid air**

A.I. Egorov, S.I. Stepanov

Abstract

At present paper a new setup for creating artificial ball lighting with high efficiency has been described. More than 1500 autonomous glowing plasmoids were obtained by the setup. It has been found that ball lightning has lifetime  $\leq 1$  s and complicated internal structure. A negative charged envelope surrounds a glowing core.

Аннотация

Создана экспериментальная установка, которая позволяет с высокой воспроизводимостью получать искусственные шаровые молнии. С помощью этой установки получено более 1500 летящих светящихся плазмоидов и определены их основные свойства. Установлено, что шаровые молнии живут  $\leq 1$  с и имеют сложное строение – отрицательно заряженная оболочка окружает светящийся керн.

© ПИЯФ, 2004

Сообщения о наблюдении шаровой молнии регулярно появляются в печати, но до последнего времени суть этого феномена остается загадкой. Обычно шаровая молния выглядит как плывущий в воздухе светящийся сфероид, диаметром 15–20 см, со временем жизни, измеряемым секундами [1,2].

Рассматривая возникновение шаровой молнии из линейной, Барри предположил, что на промежуточной стадии происходит образование плазменной струи – токового канала во влажной атмосфере, с округлой светящейся головной частью. При определенных условиях головная часть струи может отделиться и просуществовать некоторое время в виде свободно летящего плазмоида [2, стр.14].

Экспериментальная установка для получения плазменных струй и плазмоидов [3,4] представлена на рис.1. Основу установки составляет конденсаторная батарея емкостью 0,6 мФ, которую можно заряжать до 5,5 кВ. Полиэтиленовая чаша, диаметром 18 см, заполнялась на 15 см слабопроводящей водой. Можно использовать жесткую природную воду, содержащую 5–7 мг-экв/л бикарбонатов кальция и магния. На дне чаши находится медный электрод в виде кольца, соединённый изолированной медной шиной с положительным полюсом конденсаторной батареи. Отрицательный полюс соединен с электродом, расположенным в центре чаши, у поверхности воды, и направленным вверх, в воздушное полупространство. Этот цилиндрический электрод, диаметром 5–6 мм, из угля, меди или алюминия, окружает кварцевая трубка, которая возвышается над ним и над поверхностью воды на 3–5 мм.

Для получения искусственной шаровой молнии центральный электрод смачивают каплей воды. При быстром замыкании–размыкании разрядника из электрода с резким хлопком вылетает плазменная струя, которая тормозится в воздухе, и от нее отделяется летящий светящийся плазмоид (рис. 2).

Округлость плазмоида зависит от геометрической формы центрального электрода и от величины поданного напряжения. Плазмоиды могут иметь форму короны или тора, варьируя параметры разряда, им всегда можно придать форму сфероида.

Цвет плазмоида зависит от состава вещества, вовлеченного в электрический разряд: с угольного электрода срываются плазмоиды с серо-голубым керном и сиреневой оболочкой. Окраску плазмоидов, вылетающих из влажных металлических электродов, определяет линейчатый спектр материала электрода. С железного электрода слетают ослепительные белёсые плазмоиды, с медного — зелёные, с алюминиевого — белые с красноватым отливом.

В соответствии с данными фотодатчика оказалось, что большинство плазмоидов живёт 0,4–0,6 с, но отдельные, редкие экземпляры были заметны в течение 0,8 с. Время жизни плазмоидов зависит от ряда факторов: от разности потенциалов между электродами, от длительности импульса тока, от размера и геометрической формы центрального электрода и электрических и магнитных полей на пути плазменной струи.

Для исследования электрических свойств плазменной струи и шаровых плазмоидов использовалась следующая аппаратура (рис.1). Для измерения напряжения  $U_1$  между электродами, параллельно им, подключался резистор  $R_1 = 100$  кОм, с части которого напряжение подавалось на АЦП. Светимость плазмоида регистрировал фотодатчик – кремниевая фотоматрица 24×36 мм, снабженная объективом. Поле зрения фотодатчика охватывало только часть траектории плазмоида, от высоты  $H_1 = 15$  см над центральным электродом до высоты  $H_2 = 50$  см.

На рис.3 представлен график, показывающий зависимость напряжения на электродах и зависимость светимости летящего плазмоида от времени. Вылетающая из центрального электрода плазменная струя поднимается на высоту 15–20 см за 0,1 с – только в этот период времени между электродами, находящимися в сосуде, существует разность потенциалов и протекает ток (~50 А в начале разряда). Через 0,1 с электрический разряд прекращается, и плазмоид начинает автономный полет, медленно поднимается вверх и светится только за счет аккумулированной энергии. Через 0,5 с плазмоид, имея небольшую светимость, выходит из поля зрения фотодатчика.

Для измерения электрического заряда плазмоид направлялся в сетчатый цилиндр Фарадея. Цилиндр имел диаметр 25 см и находился на высоте 30 см от поверхности воды. Для уменьшения наводок сетчатый цилиндр окружал дополнительный экран из заземленных проволочек. Сетка цилиндра соединялась с землей через резистор 2 МОм, к которому был подключен операционный усилитель с высоким входным сопротивлением. На рис.4 приведена зависимость от времени тока через этот резистор. Сначала регистрируется наводка от разряда, далее электрический сигнал отсутствует — в это время плазмоид поднимается к цилиндру, затем появляется ток, вызванный перетеканием заряда плазмоида на сетку. Интегрируя этот ток, можно определить заряд плазмоида – он оказался отрицательным, и величина его находилась в пределах минус 8 — минус 12 нКл.

Внутреннее распределение зарядов в плазмоиде исследовали с помощью одиночного электрического зонда (рис.1). Зонд представляет собой шарик из нихрома диаметром 0,4 мм. Зонд через резистор 5 МОм

соединялся с землей. К резистору подключался усилитель, напряжение с которого поступало на АЦП. Для того чтобы вычесть из сигнала зонда синфазную помеху, возникающую от изменения электрического поля, отводящий провод зонда был скручен с компенсирующим проводом. Компенсирующий провод через такой же резистор соединялся с землей и подключался к инверсному входу усилителя. Оба провода были помещены в экран и в стеклянную трубку.

Было обнаружено, что зонд сильно воздействует на плазмод, разряжает его и сокращает длительность свечения до 0,3 с. Зависимость тока зонда от времени приведена на рис.5. Сигнал зонда соответствует сбору отрицательных зарядов и состоит из нескольких последовательных стадий. Большой, но короткий, импульс тока появлялся в тот момент, когда плазмод, всплывая, касался зонда своим верхним краем. Более длительный, но меньший, сигнал поступал от внутреннего плазменного ядра. Продолжительность этой стадии, около 50 мс, соответствовала размеру всплывающего плазмоида. В завершении наблюдался второй, небольшой, всплеск тока от нижнего края плазмоида. Этот сигнал наблюдался у тех плазмодов, которые имели правильную сферическую форму.

Ток с зонда, помещенного в плазму, зависит от площади зонда, от массы и концентрации носителей заряда и от разности потенциалов между зондом и плазмой. Острый пик тока от края плазмоида может быть вызван только резким увеличением концентрации зарядов в поверхностном слое. Интегрируя ток зонда по времени можно определить заряд, который стек через зонд. Этот заряд, около минус 10 нКл, оказался близким к заряду плазмоида, измеренному сетчатым цилиндром.

Если принять, что заряд плазмоида сосредоточен в сферическом объеме радиуса  $R = 6$  см, потенциал плазмоида относительно земли можно оценить как  $\varphi = kQ/R \approx -1300$  В. Исследование плазменной струи одиночным зондом, помещенным на высоту 12 – 18 см над поверхностью воды, показало, что ее потенциал отрицательный и составляет минус 1,8 — минус 2,2 кВ. Из этих измерений следует, что плазмод получает свой заряд от верхней части плазменной струи. Данные электрических измерений, приведенные на рисунках 3 – 5, относятся к плазмоидам, вылетевшим из угольного электрода.

Электрические поля разрушают плазмод. В большом плоском конденсаторе шаровой плазмод расщепляется и растягивается в стороны. По-видимому, популяция гидратированных ионов, находящихся в плазмоиде, состоит из примерно равных количеств положительных и отрицательных ионов, но из проведенных экспериментов следует, что

отрицательных зарядов больше.

На металлических поверхностях рекомбинация ионов резко ускоряется, и металл поверхности расплывается. Кольцо из медной или нихромовой проволоки, подвешенное на пути плазмоида, теряет некоторую часть своей массы, что можно установить контрольным взвешиванием. Чем ниже на пути плазмоида помещалось проволочное кольцо, тем больше была потеря массы.

В отличие от плазменной струи, свободно летящий плазмоид не обугливает бумагу и не пережигает хлопчатобумажную нить. Этот эффект также сильно зависит от высоты, на которой помещалось испытываемое тело. Среднюю температуру плазмоида можно оценить по скорости его вертикального перемещения. Если принять плазмоид за клуб теплого влажного воздуха диаметром 14 см, который всплывает в атмосфере при 293 К со скоростью 0,8 – 1,0 м/с, то расчетная средняя температура будет близка к 330 К (Приложение 1).

Существует несколько процессов, приводящих к образованию плазменных струй в атмосфере. Искусственную плазменную струю получают при запуске в грозовое облако ракеты с хвостом из проволоки или проводящего аэрозоля [2, с.115]. Плазменная струя выбрасывается из влажных предметов, вокруг которых возникло большое электрическое поле после удара линейной молнии [1]. Важно, что в ряде случаев в естественную шаровую молнию попадает вещество, диспергированное при электрическом разряде. Это может быть сажа, различные органические соединения, частички почвы, глина и т. п. Авторы работы [5] связывают свойства природной шаровой молнии с составом и количеством дисперсной фазы.

Для получения искусственных аэрозольных плазмоидов на центральный электрод (рис.1), смоченный каплей воды, наносили смесь органических и неорганических веществ, оксидов металлов и угля. Для создания плазмоидов с углеродным аэрозодем чаще всего использовали суспензию из 3 г коллоидного графита, 10 мл ацетона (смачиватель) и 90 мл воды. Если 1 – 2 капли этой суспензии нанести на угольный электрод, то при разряде из него вылетит яркий плазмоид апельсинового цвета. Количество углерода, вводимого в разряд можно оценить в 1,5 мг для плазмоида, полученного из смеси воды с ацетоном. В плазмоиде может присутствовать около 15 мг воды из влажного воздуха над банкой и около 30 мг воды, помещенной на электрод. Таким образом, на  $6 \cdot 10^{10}$  элементарных зарядов (составляющих заряд  $-10$  нКл) приходится около  $6 \cdot 10^{19}$  атомов углерода и  $(6 - 20) \cdot 10^{20}$  молекул воды.

Соли натрия и кальция подкрашивают плазмоид в желтый и

красноватый цвет. Видимая окраска плазмоида зависит также от условий наблюдения [6]. Появление в плазменной струе накалившихся пылевых частиц сопровождается плазмохимическими реакциями, из которых отметим реакцию углеродных частиц с водяными парами с образованием водорода.

Всего мы получили и исследовали более 1500 шаровых плазмоидов. Воспроизводимость экспериментов была полной. При проведении этой работы Г. Шабановым сделаны сотни фотографий плазмоидов, на которых зафиксированы их различные формы. Видеосъемки плазмоидов и плазменных струй, выполненные С. Емелиным и А. Пирозерским, размещены на интернетсайте [7].

Можно считать, что плазмоид имеет сложное строение. Это клуб теплого воздуха, который содержит популяцию гидратированных отрицательных и положительных ионов и, возможно, заряженные аэрозольные частицы. При образовании плазмоида электроны, которые находились в верхней части плазменной струи, мигрируют к поверхности плазмоида и концентрируются в тонком сферическом слое, обогащая его отрицательными зарядами.

Наши исследования включали демонстрацию плазмоидов очевидцам естественной шаровой молнии – они подтвердили видимое сходство обоих явлений. В ходе демонстраций нам пришлось столкнуться с так называемым эффектом послеобраза [1, стр.34], – у некоторых наблюдателей вспышка плазменной струи вызывает стойкое пятно на сетчатке глаза, которое сохраняется в пределах десяти секунд и перемещается в пространстве при повороте головы. Из-за этого эффекта факт существования долгоживущих шаровых молний неоднократно ставился под сомнение.

По мнению Барри, шаровая молния существует, чаще всего, 1 – 2 с. Такое или меньшее время жизни отмечалось в 80% собранных им сообщений [2, стр.46]. Остающиеся 20% связаны с эффектом послеобраза и с долгоживущими феноменами, природу которых еще предстоит исследовать. Следует отметить, что, по статистике Стаханова, шаровых молний с временем жизни более 10 с наблюдается около 50%. Он отмечал, что в этом вопросе нет ясности из-за наблюдательной селекции: маленьких и короткоживущих молний регистрируется меньше, чем реально возникает, а большие и долгоживущие учитываются все.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Г.Д. Шабанову, без участия которого это исследование было бы невозможным, С.Е. Емелину и А.Л. Пирозерскому за неоценимую помощь в проведении экспериментов, В.М. Лобашову за постоянную поддержку

работы, И.П. Райзеру за ценные обсуждения, Е.А. Дробченко за помощь в разработке аппаратуры, И.Г. Стахановой за постоянный интерес к работе.

## Приложение 1

Оценим температуру плазмоида по скорости его вертикального перемещения. Будем считать, что плазмоид является клубом теплого воздуха, который всплывает в атмосфере с температурой  $293^\circ\text{K}$  за счет того, что он теплее окружающего воздуха. Скорость всплывания можно измерить по кадрам видеосъемок [8], на основании которых выполнен рис.6, – она оказалась равной  $0,91\text{ м/с}$ . Оценим число Рейнольдса  $Re$  для этого всплывающего шара:

$$Re = 2R\rho v / \eta, \quad (1)$$

где  $R$  — радиус шара,  $\rho$  — плотность окружающего воздуха,  $v$  — скорость движения шара,  $\eta$  — вязкость окружающего воздуха. Подставляя в формулу 1 справочные данные  $\rho = 1,3\text{ кг/м}^3$ ,  $\eta = 1,72 \cdot 10^{-5}\text{ кг/м} \cdot \text{с}$  и экспериментальные данные  $v = 0,91\text{ м/с}$ ,  $R = 7\text{ см}$ , получаем

$$Re = 9600 .$$

Так как движение турбулентное, то для расчета силы сопротивления  $F$  придется использовать не формулу Стокса, а какую-либо формулу для турбулентного режима движения, например, формулу Л. Клячко [9]:

$$\psi = 24 / Re + 4 / \sqrt[3]{Re} . \quad (2)$$

Формула 2, в которой фигурирует только первый член в правой части, представляет собой формулу Стокса для ламинарного режима. Параметр  $\psi$ , фигурирующий в формуле 2, выражается следующим образом

$$\psi = F / (\rho v^2 \pi R^2 / 2), \quad (3)$$

где  $F$  — сила сопротивления движению. Подставляя данные в формулы 1 – 3, получаем, что  $F = 1,76 \cdot 10^{-3}\text{ Н}$ .

Очевидно, что на плазмоид действуют три силы:  $\rho_{\text{plasm}} Vg$  — сила веса нагретого плазмоида ( $\rho_{\text{plasm}}$  — плотность нагретого газа плазмоида,  $V$  — объем плазмоида,  $g$  — ускорение свободного падения); выталкивающая сила  $\rho Vg$  и подсчитанная выше сила сопротивления  $F$ .



Из рис. 6 видно, что при всплывании шара не происходит заметного изменения его скорости – нет ускорения. Тогда закон Ньютона для этих сил (в проекции на вертикальную ось, направленную вверх) можно записать в виде

$$\rho_{\text{plasm}} Vg - \rho Vg - F = 0. \quad (4)$$

Теперь, используя уравнение состояния газа, можно оценить, насколько плазмод теплее окружающего воздуха:

$$(\rho - \rho_{\text{plasm}})/\rho = \Delta T/T. \quad (5)$$

В результате получаем  $\Delta T = 30^\circ$ , т.е. средняя температура плазмоида близка к  $330^\circ \text{K}$ .

Здесь уместно заметить, что Стаханов на основании обработки массива показаний очевидцев пришел к выводу, что температура природной шаровой молнии близка к комнатной [1, стр.83].

## Приложение 2

Компьютерным моделированием поведения положительных и отрицательных ионов в воздухе, содержащем водяные пары, установлены особенности гидратированной плазмы, как состояния вещества.

Молекула воды обладает значительным дипольным моментом из-за неоднородного распределения плотности электронов по молекуле. Диполи воды присоединяются к заряженным ионам и обволакивают частички аэрозолей. Энергия связи первой молекулы воды и иона  $\text{H}^+$  – 7,18 эВ, второй – 1,6 эВ, пятой – 0,51 эВ [10]. Столь же велика энергия связи диполей воды с другими ионами, положительными и отрицательными.

В работах [10,11] проведено компьютерное моделирование процесса взаимодействия молекул воды с ионами  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  в воздухе, содержащем водяные пары. Установлено, что при сближении гидратированных ионов разного знака между ними втягиваются дополнительные молекулы воды и образуются долгоживущие дипольные кластеры. Молекулы воды препятствуют рекомбинации ионов, и их время жизни в кластере возрастает до десятков минут, т. е. на 10 – 12 порядков. Дипольный момент образовавшегося кластера на порядок больше, чем у молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ .

Клуб теплого влажного воздуха может аккумулировать значительную энергию (до 10 Дж/л), если получит от внешнего источника ионы разного знака. Из-за диполь-дипольного взаимодействия кластеров в гидратированной плазме могут возникать цепочечные и пространственные структуры.

Как показывает проведенное нами исследование плазмоидов, особую роль в создании сферических плазмоидов из холодной гидратированной плазмы играет избыток электронов. Они мигрируют к поверхности плазоида и образуют на его границе отрицательную оболочку, скорее всего, из гидратированных ионов  $\text{O}_2^- \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$ . Влияние заряженной оболочки нужно учитывать при моделировании шаровой молнии.

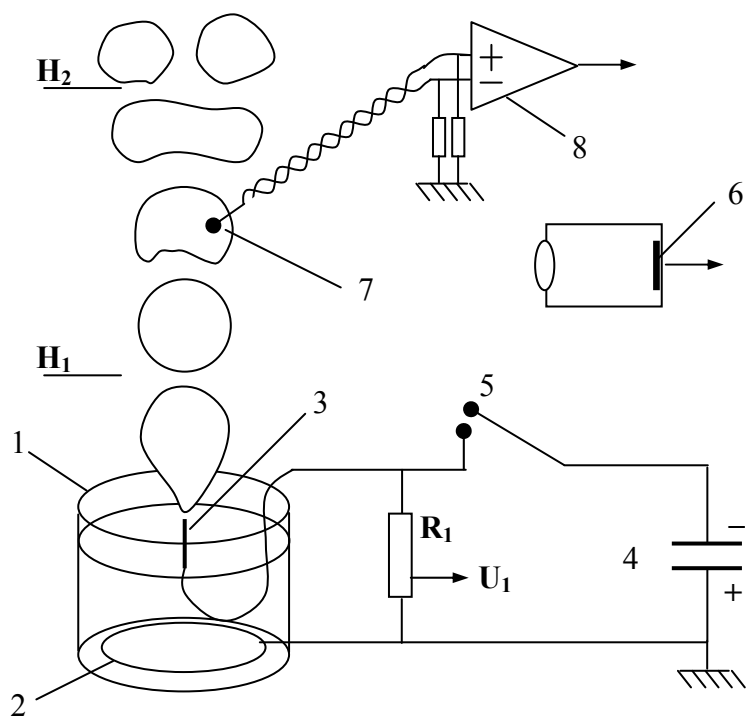


Рис.1. Установка для получения плазменных струй и автономных плазмоидов: 1 – полиэтиленовая емкость, 2 – кольцевой электрод (анод), 3 – центральный электрод, 4 – конденсаторная батарея, 5 – разрядник, 6 – фотодатчик, 7 – зонд, 8 – усилитель сигнала зонда.

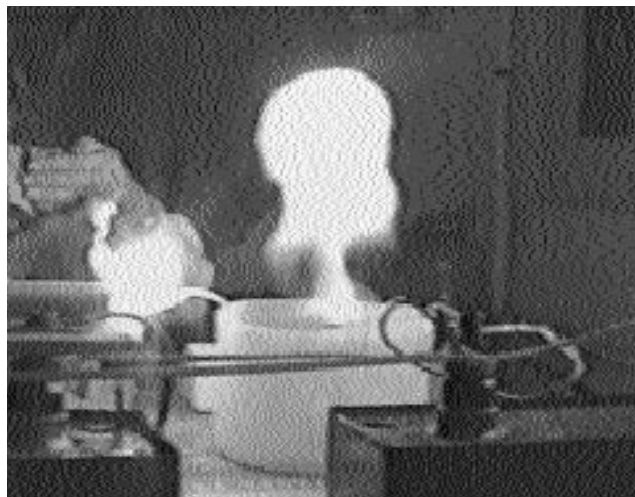
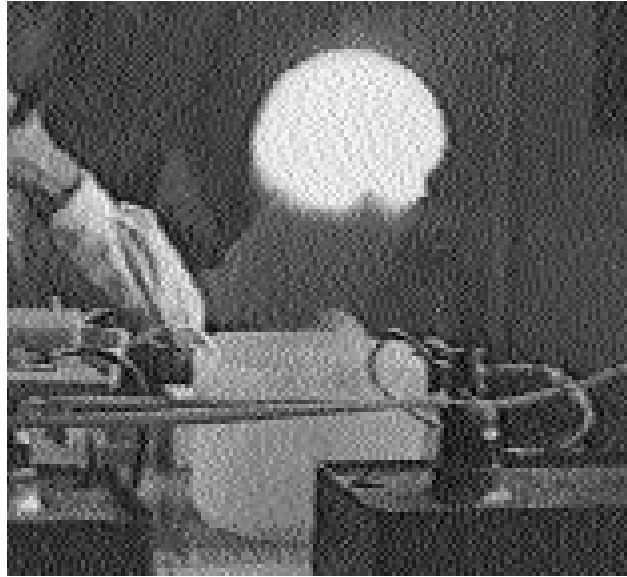


Рис.2. Стадии рождения и полета плазмоида.



Рис.3. Зависимость светимости летящего плазмоида и напряжения между электродами от времени.

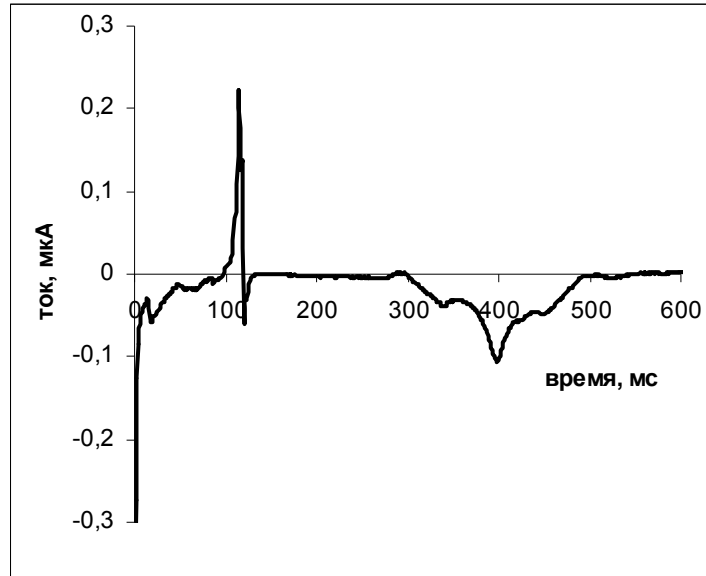


Рис. 4. Зависимость от времени тока с сетчатого цилиндра Фарадея. Острые пики в начале вызваны наводками. Плазмоид достиг цилиндра через 300 мс после начала разряда.

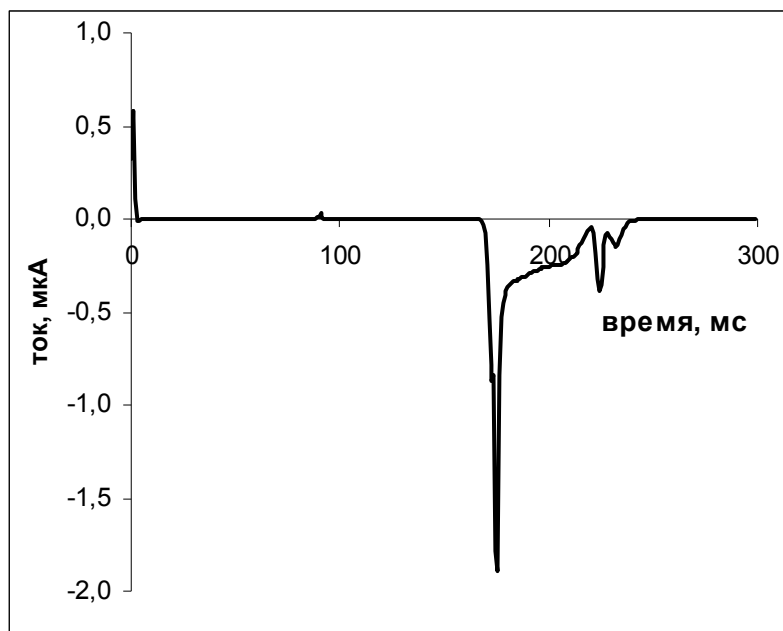


Рис.5. Зависимость тока зонда от времени. Плазмоид коснулся зонда своей верхней границей через 180 мс после начала разряда.

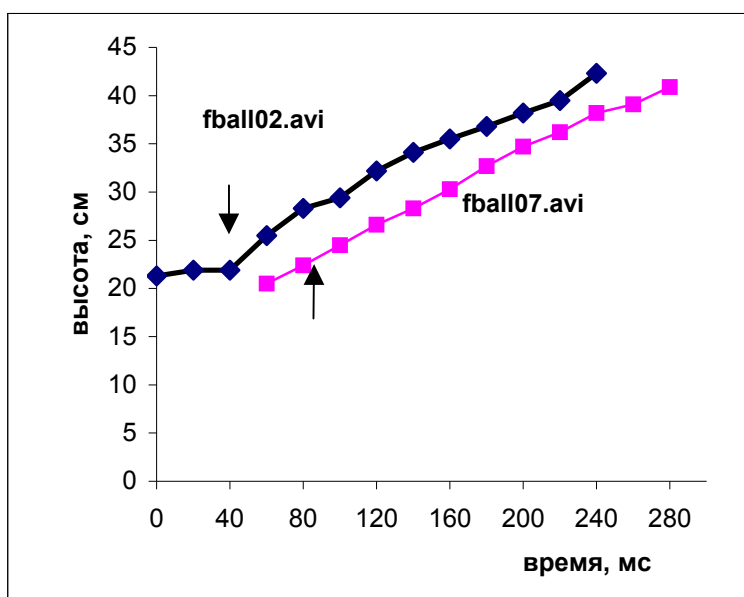


Рис.6. Координаты поднимающегося плазмоида в зависимости от времени. Стрелками показаны моменты окончания разряда. Координаты получены обработкой видеofilьмов “fball02.avi” и “fball07.avi”, размещенных по интернет-адресу [8].



## Литература

1. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии, М.: Научный мир, 1996, 3-е изд.
2. Барри Дж.Д., Шаровая молния и четочная молния, М: Мир, 1983.
3. Егоров А.И., Степанов С.И., ЖТФ, **72**, 102 (2002).
4. Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д., УФН, **174**, 107 (2004).
5. Hubble G.X. Nature, **403**, 487 (2000).
6. Шабанов Г.Д., Письма в ЖТФ, **28**, 81 (2002).
7. <http://www.balllightning.narod.ru>
8. ftp://biol.pnpi.spb.ru/pub/people/stepanov
9. Фукс Н.А., Механика аэрозольей, М., Изд. АН СССР, 1955, 352 с.
10. Шевкунов С.В., ЖЭТФ, **119**, 485 (2001).
11. Шевкунов С.В., ДАН, **379**, 181 (2001).