

В.Б. ЮФЕРОВ, д-р физ-техн. наук, нач. отд. ННЦ ХФТИ, Харьков
Е.В. МУФЕЛЬ, мл. научн. сотр. ННЦ ХФТИ, Харьков
В.И. ТКАЧЕВ, мл. научн. сотр. ННЦ ХФТИ, Харьков
С.В. ШАРЫЙ, мл. научн. сотр. ННЦ ХФТИ, Харьков
А.Н. ШАПОВАЛ, научн. сотр. ННЦ ХФТИ, Харьков

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПЛАЗМЕННЫХ РАЗРЯДОВ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОДЫ

Створена експериментальна установка, що дозволяє здобувати автономні сферичні плазмові утворення. Досліджено процеси, що відбуваються в початковій стадії розряду. Описано два можливих сценарії їх розвитку. Приведені вольт-амперні і спектральні характеристики плазмодів, а також фотографії розвитку розряду в часі.

Создана экспериментальная установка позволяющая получать автономные сферические плазменные образования. Исследованы процессы происходящие в начальной стадии разряда. Описана 19481
ны два возможных сценария их развития. Приведены вольт-амперные и спектральные характеристики плазмодов, а также фотографии развития разряда во времени.

В работах [1-3] были представлены эксперименты по созданию автономных плазменных образований, имитирующих шаровые молнии и теоретические данные о возможной роли гидратированных ионов. Однако имелись вопросы по начальной стадии разряда, не освещенные в [1]. Экспериментальная система (рис. 1) повторяла описанную в [1], дополненная шунтом, для измерения токов. На рис. 1 использованы обозначения: конденсаторная батарея $C=1200$ мкФ, К – размыкатель, R_1 – измеритель напряжения R_2 – шунт для токовых измерений, РК – диэлектрическая разрядная камера – сосуд с двумя электродами: – кольцевым заземленным и центральным под отрицательным потенциалом, с электроизолированными тоководами. Видеозапись разрядов проводилась сверху и сбоку со скоростью до 1000 кадр/с. С помощью светодиодов измерялось свечение плазменных образований. В большинстве экспериментов разрядное напряжение было на уровне 3–4 кВ, центральный электрод был железным в фарфоровом изоляторе, на 1–5 мм выступающий над уровнем электрода и воды, схематический его вид представлен на рис. 2.

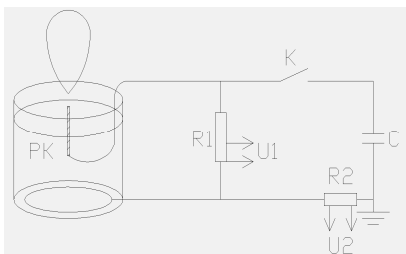


Рис. 1.

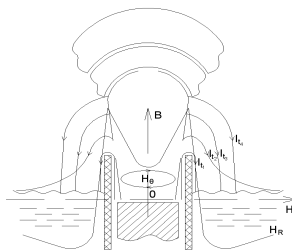


Рис. 2.

Токонесущий плазменный столб и токовые каналы – функции времени, и уединенные плазмоиды. Зависимость радиального магнитного поля и магнитные силовые линии внутри изолятора. Диаметр диэлектрической разрядной камеры изменялся от 10 см до 50 см, глубина от 4 до 30 см, однако, существенного влияния размеров сосуда на параметры плазмоида не обнаружено.

На рис. 3, (нулевой кадр) представлено фото стационарной фазы разряда - протекание тока по изолятору (напряжение 1 кВ, ток ~ 0,1 А). Повышение разрядного тока до 0,2 А приводит к увеличению количества параллельных плазменных каналов. Возможно, при повышении тока до 100 А и выше разряд по изолятору может стать почти сплошным. На рис. 3 и 4 показано временное развитие разряда, полученное при скорости съемки - 210 и 420 кадр/с соответственно. Рис. 3 (вид сверху, под углом 45°). На кадре 1 виден плазменный канал, идущий от электрода и достигающий изоляционной стенки сосуда - разрядной камеры. Этот канал возникает на месте первоначального стримера, который просматривается не на всех кадрах, что объясняется величиной интервала времени между кадрами, при данной скорости съемки. Кроме того, на поверхности жидкости его яркость незначительна, однако, видно свечение на изоляторе центрального электрода и световое пятно на стенке диэлектрической разрядной камеры. На кадре 2, через 5 мс, видна уже система плазменных каналов разряда, доходящая до изоляционной стенки, а также закороченными на поверхность воды. В центре, над электродом уже возник плазменный столб. Прямолинейный светящийся отрезок в правой части кадра, идущий от центра – это токоввод центрального электрода в изоляции. Он находится внутри жидкости и просматривается на всех кадрах. На четвертом кадре, через 20 мс, токовые каналы разряда плохо видны на фоне основного разряда, часть из них пришли под плазменный факел, который все больше расширяется в радиальном направлении.

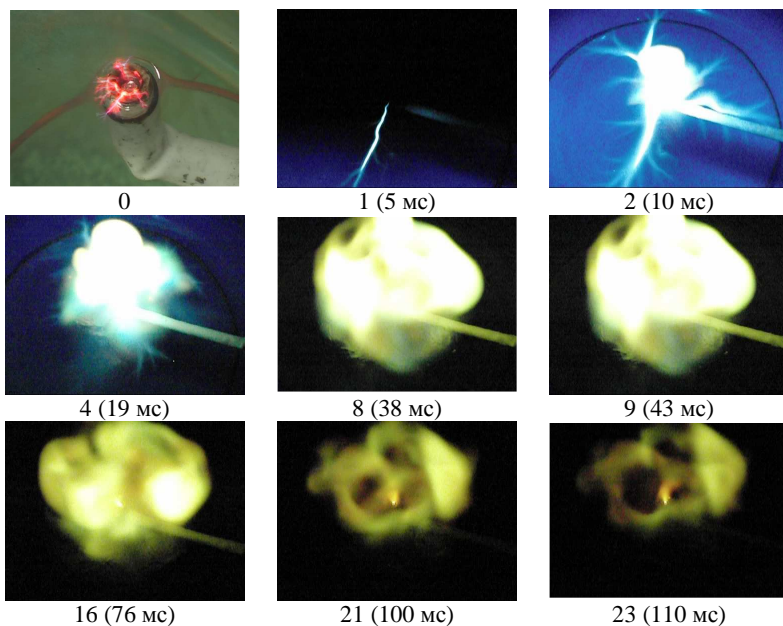


Рис. 3.

Эти каналы, светящиеся шнуры голубого цвета, токопроводы, начинаются из-под верхней части плазменного факела, приблизительно в $5 \div 10$ см над электродом. Возможно здесь наблюдается эффект магнитной изоляции плазменного столба, проявляющийся в том, что плазменные тоководы начинают распространяться в радиальном направлении только с этой высоты.

На фотографиях видно, что изменяется не только яркость свечения, но и форма плазменного образования приближается к шарообразной. Далее появляются более и менее светящиеся области. В центре видна область типа свечки, это плазменный столб, выходящий из центрального электрода, яркость свечения которого снижается. Далее разряд вырождается, появились две темных области, окруженные светящимися слоями – своего рода токовыми траекториями, имеющие замкнутый характер. Величины разрядных токов в это время малы, соответственно малы и магнитные поля, их окружающие. Тем не менее они оказывают формирующее и удерживающее действие на низкотемпературную плазму состоящую, по нашему мнению, из гидратирован-

ных ионов которые подвержены действию слабых магнитных полей на уровне 0,2 Эрс (кадры 21 и 23).

Рис. 4, дает вертикальную картину динамики развития разряда (вид сбоку). Здесь следует отметить зеркальное отражение разряда границей воды. Видны токовые каналы, идущие над поверхностью жидкости. Высота плазменного столба на первом кадре около 2,5 см, на втором – 12 (в разных сериях экспериментов она доходила в начальный момент до 5 см). В дальнейшем его высота достигает 15 см на третьем кадре и далее медленно растёт.

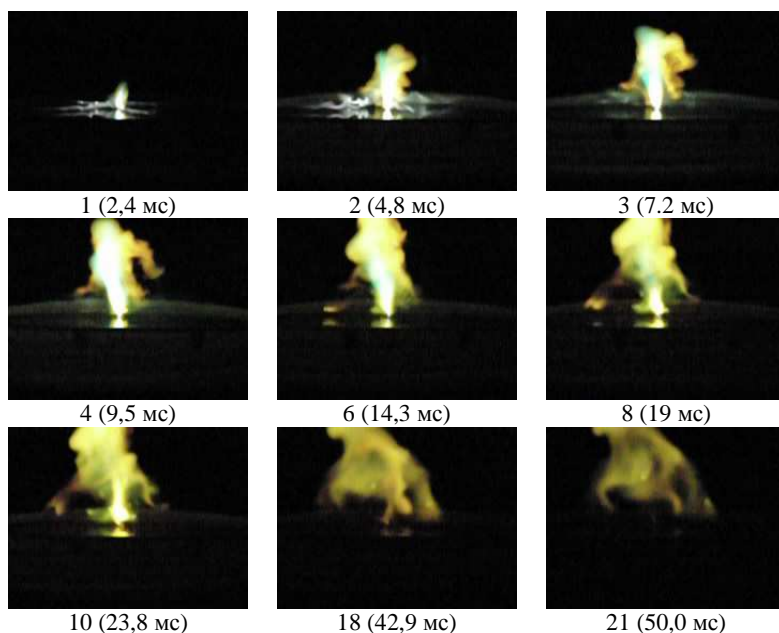


Рис. 4.

До 25 мс виден довольно яркий плазменный столб-канал, идущий от центрального электрода. К 45 мс плазменный канал не просматривается однако три токопроводящих канала идущих к воде и стенкам существуют.

На осциллограммах 5 и 6 приведены вольтамперные характеристики развития разряда. На рис. 5, нижняя кривая – зависимость на-

пряжения от времени, верхняя кривая – токовая характеристика (20 мс/дел).

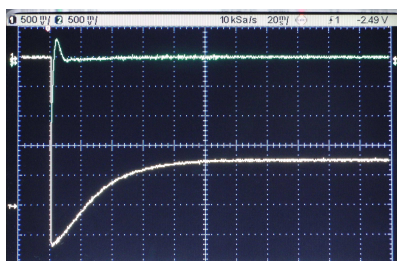


Рис. 5.

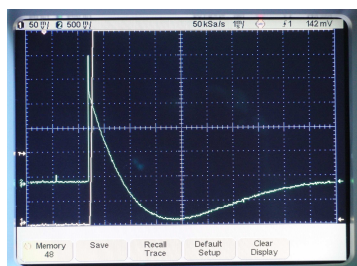


Рис. 6.

Максимальная амплитуда величины зарядного напряжения батареи 4 кВ. Такая же характеристика представлена в другом масштабе (1 мс/дел) и другой развертке (рис. 6). Как видно токовый сигнал на обоих кадрах имеет достаточно высокие характеристики только в первые 10 мс. Короткий всплеск в первый момент около 1 кА и последующий спад с изменением знака. Здесь ток меньше, максимальная амплитуда достигает 270 А и далее длительный спад. Оценка тока разряда из кривой напряжения на рис. 6 дает величины тока: ~36 А за промежуток 0–20 мс, 28 А за период 20–40 мс, 17 А за 40–60 мс, 7 А за 60–80 мс и т.д. Как видно относительно сильноточный разряд составляет не более 1/10 общего времени разряда и существование автономного плазмоида сопровождается малыми разрядными токами.

Интенсивности свечения плазменного образования представлены на рис. 7. Нижняя кривая – зависимость напряжения на разряде от времени, верхняя кривая – свечение плазмы. Данные получены со светодиода принимающего полное интегральное (широкая апертура) излучение разряда. Как видно (рис. 8) интегральная интенсивность свечения слабо зависит от напряжения зарядки батареи и, соответственно, начальных токов разряда, хотя и несколько увеличивается с увеличением зарядного напряжения. Кроме того, интенсивность свечения уже не связана с высокими токами разряда. На рис. 9 представлены два типа характеристик. Верхняя кривая – интегральная светимость плазменного образования, нижняя система кривых – интенсивности свечения плазменной струи (столба) на разных высотах (получено при сильной коллимации светодиода). Поскольку плазменная струя истекает из центрального электрода, ее яркость определяется разрядами по изолятору и их током, идущим по токовым каналам на изоляторе, ко-

которые не остаются постоянными и перемещаются во времени и пространстве, что отражается на величине яркости плазменного столба. Яркость факела, в общем-то, коррелирует с токовой характеристикой, но только вблизи электрода. При удалении на 3–4 см уже проявляется длительное послесвечение. Т.е. все указывает на длительное существование возбужденных состояний молекул или их кластеров, которые локализованы в периферийных областях разряда, т.е. там, где температура ниже.

На рис. 10 представлены спектральные характеристики разряда. Оптический спектр измерялся на расстоянии 3–5 мм выше центрального электрода. По мере удаления от электрода, подобно рис. 9, яркость линий падает, а их количество уменьшается. Исчезают линии $H\beta$ и $H\alpha$, что свидетельствует об охлаждении плазмы, исчезают линии кальция, но линии натрия остаются до расстояний в 30 см.

Проводились эксперименты и с соленой водой, до 10 г/л. Разряд сопровождался интенсивным хлопком, имел большую яркость.

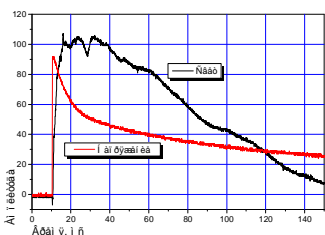


Рис. 7.

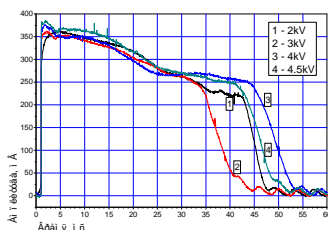


Рис. 8.

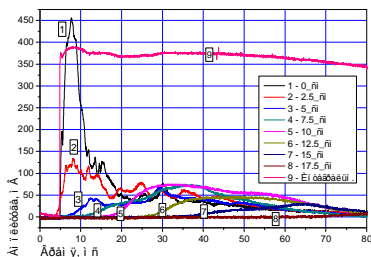


Рис. 9.

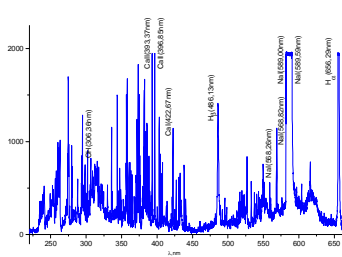


Рис. 10.

Возможны два сценария начальной стадии развития разряда.

1. В начальной стадии разряда наблюдаются кратковременные высокие разрядные токи. Они связаны с зарядкой водяной емкости, образованной электродами в водяном бачке, от основной батареи. Для

проверки гипотезы о зарядке водной емкости была собрана эквивалентная схема в которой разрядная кювета заменялась емкостью и сопротивлением. При $C=10$ пФ и $R=3$ Ом начальный участок токовой кривой оказался подобным полученному на рабочей схеме.

При разрядке водной емкости на электродах появляется значительная разность потенциалов, $U=L \cdot dl/dt$, превышающая напряжение зарядки конденсаторной батареи. Именно это напряжение и приводит к пробоем больших воздушных промежутков. Для кольцевой системы, представленной на рис. 1 это 20 см, для линейной системы это 50 см. При таких длинах величина пробойного напряжения должна достигать 50–60 кВ. Появляется стример и далее плазменный канал. Одновременно развивается пробой по изолятору. При таких токах и появлении такой разности потенциалов на центральном электроде возможна взрывная эмиссия и возникновение электронного пучка, который тормозится в атмосфере. Высота плазменного столба (плазменного факела) на кадре 1 рис. 1 около 2,5–5 см, что соответствует пути торможения электронного пучка с энергией около 60 кВ в воздухе при атмосферном давлении. В процессе торможения пучка, сопровождаемом процессами ионизации и возбуждения молекул воздуха, происходит "ультрафиолетовая подсветка" всего пространства, окружающего центральный электрод. Длительность существования пучка соответствует времени разрядки водной емкости, далее идет газовый разряд над поверхностью воды.

2. При пробое изолятора центрального электрода текут большие токи, и токовые траектории заполняют почти все пространство изолятора. Каждая токовая траектория на изоляторе эквивалентна плазменному источнику известного типа – "рельсотрон", где ускоряется плазменная перемычка между двумя противоположно направленными токами. В нашем случае плазменная перемычка находится на верхнем торце изолятора. С самого начала прямой и обратный токи разделены, вначале изолятором, а далее, по мере передвижения вверх плазменной перемычки, магнитным полем H_{θ} вокруг идущего вверх токнесущего плазменного столба. Обратные плазменные токопроводы начинаются на плазменном столбе, на высоте около 10 см. Они закорачиваются на воду и светящуюся изоляционную стенку. Распространяющаяся вверх плазма, за счет торможения на атмосферном воздухе охлаждается, расширяется и образует в этой области большое количество гидратированных медленных и длительно существующих ионов. В дальнейшем распространении разряда над водой играет роль соотношение сопротивления воздушной плазмы и сопротивления воды. В случае соле-

ной воды это небольшое сопротивление, поэтому такие разряды больше локализируются у поверхности воды и центрального электрода, не давая ему сильно расширяться и уйти в автономный полет, поскольку более высокая температура в этих разрядах "сжигает" гидратированные ионы – более быстро снимая возбуждение.

Понятие гидратированные ионы – широкое понятие, включающее комплексные ионы, в состав которых входят молекулы воды и ее составляющие H^+ и OH^- . Кроме того, туда входят ионы натрия, железа, хлора и другие присутствующие в водопроводной воде. Энергозапас гидратированных ионов сравнительно не велик. Внутренняя энергия гидратированных ионов может лежать в пределах величин энергии химических реакций с максимальной стороны и с другой, на уровне энергий связи комплексных ионов, т.е. $q \approx 0,01-5$ эВ. Для понимания возможностей гидратированных ионов необходимы данные о реальном величине этих образований, их структуре, энергиях связей и полной энергии. В макроскопическом плане необходимо распределение по массам и их концентрация. Следует заметить, что гидратированные ионы не являются принадлежностью газовых разрядов высокого давления. В [4] наблюдались водо-газо-солевые комплексы, включающие около $3 \cdot 10^6$ молекул, их концентрация составляла до 10^{11} см^{-3} а время жизни десятки секунд.

Список литературы: 1. Егоров А.И., Степанов С.И. ЖТФ. – 2008. – Т. 78. – Вып. 6. – С. 15-19. 2. Шевкунов С.В. ЖЭТФ. – 2001. – Т. 119. – С. 485–508. 3. Шевкунов С.В. ДАН. – 2001. – Т. 379. – С. 181-186. 4. Юферов В.Б., Пономарев А.Н., Муфель Е.В. и др. О выведении примесей из воды с помощью акустических импульсов // ЖТФ. – 2009. – Т. 79. – Вып. 5. – С. 124-128.

Поступила в редколлегию 15.10.2009