

Исследование величины и механизма образования заряда атмосферного плазмоида

© С.И. Степанов

НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ,
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия
e-mail: stepanovsmai@googlemail.com

Поступило в Редакцию 6 июля 2022 г.

В окончательной редакции 27 октября 2022 г.

Принято к публикации 31 октября 2022 г.

Продолжено исследование долгоживущего автономного атмосферного плазмоида (Гатчинский плазмоид). Электрический заряд плазмоида обнаружен нами ранее с помощью плазменного зонда. Здесь измерительная аппаратура была усовершенствована, что позволило учесть влияние тока смещения. Измеренный заряд отрицательного плазмоида составлял около -35 нС. Установлено, что плазмоид получает заряд во время протекания тока разряда. После выключения тока заряд не стекает на электроды, предположительно из-за быстрого уменьшения концентрации заряженных частиц и уменьшения проводимости плазмы между плазмоидом и электродами. Показано, что электрический заряд является свойством плазмоида, как это ранее и полагали в отношении шаровой молнии.

Ключевые слова: атмосферный плазмоид, высоковольтный разряд, плазменный зонд, шаровая молния, электрический заряд.

DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54064.179-22

Введение

Долгоживущие плазмоиды в атмосфере, существующие после выключения тока разряда, получали неоднократно [1–4]. При получении плазмоидов происходит эрозия электродов, это определяет состав и свойства плазмы.

В 2001 г. в атмосферных условиях был получен долгоживущий плазмоид (Гатчинский плазмоид), который хорошо воспроизводится, см., например, [5–8]. Плазмоид (рис. 1) возникает при высоковольтном разряде между графитовым или металлическим электродом 2 и поверхностью воды, в которую помещен другой электрод 3. Ток разряда длится 100–150 мс, затем плазмоид существует автономно. Время наблюдения в видимом свете составляет величину до 500–600 мс, а в инфракрасном свете — до 1200 мс [9]. Структура, движение и температура плазмоида успешно исследуются не только экспериментально, но и методом численного газодинамического моделирования [10,11].

С конца 60-х и до настоящего времени существует гипотеза хранения энергии в долгоживущих светящихся плазменных образованиях, остающихся после облучения радиоволнами воздуха [12], и в Гатчинском плазмоиде [13]. По гипотезе энергия запасается в метастабильных состояниях молекул кислорода.

Между шаровой молнией (ШМ) и проводящими, в частности заземленными объектами, наблюдаются электрические разряды — искры, дуги и т.д. [14]. Эти явления принято объяснять тем, что ШМ несет электрический заряд [15,16]. Пример этих явлений описан,

например, в популярном журнале „Техника — молодежи“ от 1982 г. (номер 3, стр. 38): „Когда ослепительный шар приблизился ко мне метров на пять, волосы у меня на голове поднялись. Я чувствовал, что даже волоски на руках и груди натянулись в сторону молнии, как это бывает при настройке высоковольтной аппаратуры. Более того, от груди в сторону ШМ протянулись „ниточки“ электрических разрядов. К счастью, шар миновал меня в 3–4 метрах“.

Заряд ШМ непременно присутствует в гипотезах движения ШМ на постоянной высоте над землей [11,16,17].

Схожесть некоторых свойств плазмоида и ШМ побудила нас проверить наличие электрического заряда у плазмоида. Заряд плазмоида был обнаружен в 2008 г. [18]. Для измерения заряда плазмоида использовали зонд Ленгмюра, а также модифицированный зонд, который был выполнен в виде металлической сетки. Зондовые измерения показали заряд -12.5 нС в промежутке времени 170–220 мс с момента включения тока разряда; измерения сеткой дали -15 нС в промежутке времени 300–470 мс. Сигнал зонда начинается с пика тока. Зонд Ленгмюра в другой схеме эксперимента был применен для измерения разности потенциалов между центральным электродом и плазмоидом [19].

Цель настоящей работы состоит в усовершенствовании метода измерения заряда и в измерении заряда в зависимости от полярности электродов и от времени жизни плазмоида. В теоретическом плане целью настоящей работы являлось выяснение механизма возникновения электрического заряда.

1. Установка для получения и исследования плазмоида

Для получения плазмоида была использована установка (рис. 1), которая применялась ранее [20] и которая является версией оригинальной установки [6–8]. Разрядным устройством является сосуд с водой 1, в который помещены два электрода. Центральный графитовый электрод 2 возвышается над поверхностью воды на 2–3 мм. Он изолирован от воды кварцевой трубкой. Перед включением разряда центральный электрод смачивали небольшим количеством воды, 10–20 μl . Кольцевой электрод 3 расположен на дне сосуда. Провода, подводящие ток к электродам, проходят через дно сосуда. Это обеспечивает симметричное электрическое поле над сосудом во время разряда. Предполагается, что плазмоид формируется более симметричным и меньше отклоняется от вертикали. В сосуд наливали водопровод-

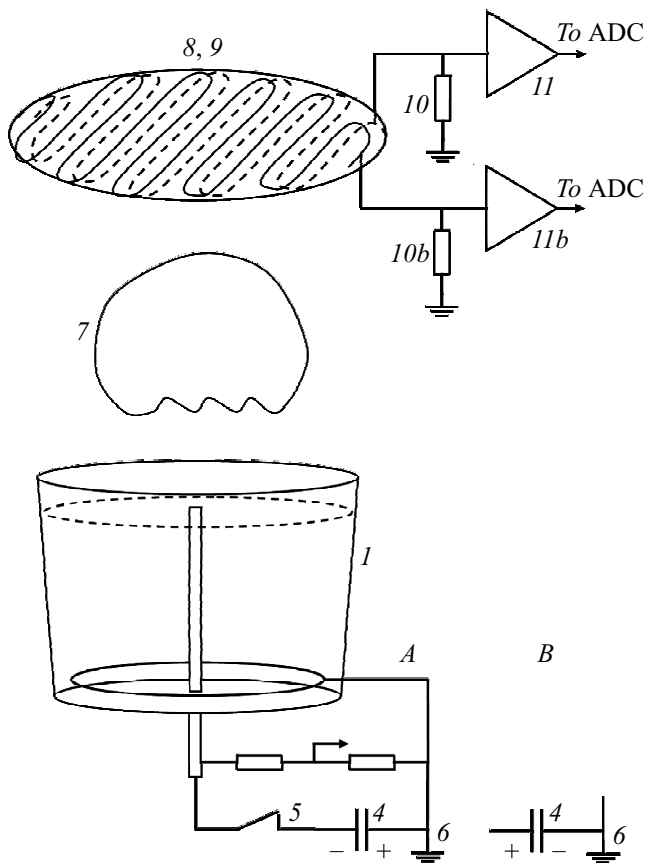


Рис. 1. Устройство для получения плазмоида и измерения его электрического заряда: 1 — сосуд с водой, 2 — центральный электрод, 3 — кольцевой электрод, 4 — высоковольтный конденсатор, 5 — высоковольтный выключатель, 6 — заземление (общий провод), 7 — плазмоид, 8 — сетка из неизолированного провода (голая сетка), 9 — изолированная сетка, 10 — резисторы, 11 — усилители. Электрические соединения, использованные в настоящей работе: А — вода является анодом; В — вода является катодом. Кольцевой электрод всегда заземлен.

ную воду, в которую добавлена треть дистиллированной воды. В ранних опытах определили, что при таком составе воды плазмоид хорошо воспроизводится [5–7]. Для получения разряда к электродам прикладывали напряжение 5 kV от батареи конденсаторов 4 емкостью 700 μF . Длительность разряда составляла 130 ms. Разряд включали и выключали высоковольтным выключателем 5, сделанным в лаборатории и примененным для получения плазмоида ранее [20]. В выключателе использована конструкция [21], которая обеспечивает быстрое выключение разряда. При выключении дуга втягивается магнитном полем в щель между диэлектрическими пластинами, где она быстро охлаждается. Таким образом, в автономной фазе существования плазмоида потенциал на центральном электроде, и, следовательно, электрическое поле от электродов над сосудом, отсутствуют.

Возможны две схемы подключения электродов к высоковольтному источнику, отличающиеся направлением тока разряда (рис. 1). Тип А: центральный электрод — это катод, вода — анод. Тип В: вода — это катод, центральный электрод — анод. Электродные процессы в этих разрядах отличаются, поэтому не стоит ожидать, что свойства этих двух плазмоидов (далее — плазмоиды типа А и В соответственно) будут полностью совпадать. Полярность типа А применяли в работах [5–9, 18–20, 22–34], в работах [35–38] применяли полярность типа В.

Измерительный прибор (зонд Ленгмюра или сетка) измеряет напряжение и ток относительно опорного (заземленного) электрода, потенциал которого принимается равным нулю. Таким образом, при исследовании плазмоида определенного типа, например, типа А, результаты будут зависеть от того, какой электрод выбран в качестве опорного. В данном исследовании в качестве опорного электрода был выбран кольцевой электрод, погруженный в воду. Опорный электрод заземлен, т.е. соединен с заземленными проводами аналого-цифрового преобразователя, компьютера и силовой сети лаборатории. Сетки соединены с опорным электродом через резисторы (10, рис. 1).

В опытах регистрировали напряжение на центральном электроде, ток разряда, светимость плазмоида, сигналы сеток. Интервал измерения составлял 1 ms. Одновременно проводили видеосъемку с интервалом 33 ms между кадрами. Над сосудом с водой было установлено зеркало, благодаря чему на каждом кадре плазмоид был виден сбоку и сверху. Это позволяло лучше видеть форму плазмоида и отклонение его от вертикальной оси симметрии. Плазмоиды типов А и В снимали одной и той же камерой. Пример съемок показан ниже (см. разд. 5, рис. 4). Как видно из этого примера, свечение плазмоида, вначале сферическое, позднее имеет вид кольца. Кольцо наблюдается до 300–500 ms в видимом свете, например в работе [9], и до 1500 ms в инфракрасном свете (там же). Авторы работы [39] публикуют фото, сделанное в ходе своих исследований. На фото нанесены стрелки, которые показывают предполагаемое движение плазмы

при формировании плазмоида (там же, Fig. 7). Плазменная струя подает плазму вверх, в плазмод. Плазмод представляет собой в это время кольцеобразный плазменный вихрь, имеющий тороидальное вращение (там же). С этой схемой согласуются результаты газодинамического математического моделирования, о котором говорилось выше [10,11].

Судя по видеосъемкам, плазмоиды типов *A* и *B* оказались не совсем одинаковые. Среднее измеренное время жизни плазмоида типа *A* составляло 550 ms, а типа *B* — 390 ms. Максимальное время — 625 и 410 ms соответственно. Радиусы плазмодов *A* оказались в среднем на 20% больше, чем радиусы плазмодов типа *B*, следовательно, их объемы отличаются на 70%.

2. Принцип и устройство для измерения заряда плазмоида

Принцип измерения заряда основан на том, что заряд плазмоида создает электрическое поле между плазмодом и заземленной сеткой. Сетка собирает заряженные частицы плазмоида, которые на нее попадают. Движение частиц обусловлено дрейфом в электрическом поле и диффузией. Сигнал с сетки поступает на усилитель, затем на измерительное устройство. Для измерения заряда следует выполнить некоторые условия. Информацию о заряде плазмоида дает та часть тока сетки, которая представляет собой дрейфовый ток. Пусть, например, плазмод имеет отрицательный заряд. Тогда потенциал плазмоида — отрицательный относительно заземленной сетки. Отрицательные частицы (электроны, отрицательные ионы) дрейфуют в поле плазмоида в сторону сетки и передают ей свой заряд. По мере прохождения плазмоида через сетку заряд его уменьшается, вместе с тем уменьшается электрическое поле и дрейфовый ток. Это приводит к неполному сбору зарядов.

Очевидно, что установка должна быть собрана так, чтобы электрическое поле около сетки создавалось только зарядом плазмоида. Тогда при условии, что дрейфовый ток больше других токов, в частности, больше диффузионного тока, заряд равен току сетки, интегрированному за время прохождения плазмоида через сетку.

Дрейфовый и диффузионный токи заряженных частиц какого-либо вида определяются, в частности, концентрацией данных частиц. Измерения показывают, что концентрация заряженных частиц в плазмодиде уменьшается со временем. Оценка концентрации электронов в плазмодиде по эффекту Штарка дали значения $(300, 8, 0.3, 0.08, 0.02, 0.01) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ при временах (3, 70, 95, 115, 175, 225) ms соответственно [19]. Ион СаII обнаруживается в плазмодиде на ранних временах по резонансным линиям 393.4 и 396.7 nm [19,26]. Об убывании концентрации этого иона можно судить по изменению интенсивности линий, которая составляла (70, 2, 0.15) условных единиц, при временах (15, 75, 135) ms [19].

Измерения термодарой [19,24] и по скорости ультразвука, проходящего через плазмодид [20], показывают, что по мере существования плазмоида температура его уменьшается. Уменьшение температуры способствует рекомбинации заряженных частиц. Присутствие паров воды приводит к образованию кластерных ионов с молекулами воды; их наблюдали с помощью масс-спектрометрии [33]. В опытах [34] в конце свечения плазмоида и после затухания свечения наблюдалось поднимающееся дымовое кольцо. Из-за рекомбинации и увеличения масс заряженных частиц дрейфовый ток уменьшается, и поэтому при пролете плазмоида через сетку имеет место неполный сбор зарядов. Этот эффект тем больше, чем больше время жизни плазмоида. Чтобы уменьшить этот эффект, сетку следует делать с минимальным размером ячеек. Однако такая сетка вносит возмущение в движение плазмоида. С этой же целью измерения желательнее делать, когда подвижность заряженных частиц еще большая, т.е. вскоре после образования плазмоида. Для этого сетку следует располагать на минимальной высоте. Однако в этом варианте возможен сильноточный разряд между центральным электродом и сеткой с повреждением аппаратуры.

Сетка, естественно, чувствительна и к току смещения, который вызван изменением во времени электрического поля вблизи сетки. Этот ток возникает потому, что заряженный плазмодид приближается к сетке, а также потому, что заряд плазмоида уменьшается в процессе самого измерения. Эти эффекты действуют противоположно. В предварительных опытах выяснилось, что ток смещения сравним по величине с током заряженных частиц. Следовательно, ток смещения вносит ошибку в измерение заряда. Чтобы учесть этот ток, в данных опытах использована дополнительная сетка (9, рис. 1). Сетка сделана из изолированного провода, что исключает поток заряженных частиц на нее. Поэтому изолированная сетка измеряет только ток смещения. Обе сетки размещены в одной плоскости с тем, чтобы чувствительность их к току смещения была одинакова. Вычитая сигнал изолированной сетки из сигнала голой сетки, получим сигнал, обусловленный зарядами, собираемыми голой сеткой. Интегрируя этот сигнал, получим заряд плазмоида.

Сетки подключены к одинаковым резисторам *10* и *10b* ($5 \text{ M}\Omega$); усилители *11* и *11b* также были одинаковы. Голоя сетка была сделана из нихромового провода диаметром 0.2 mm. Изолированная сетка была сделана из медного провода диаметром 0.5 mm с фторопластовой изоляцией толщиной 0.25 mm. Двойная сетка имела диаметр 20 cm. Для настройки двойной сетки возле нее помещали пластину, на которую подавали переменное напряжение. Если при вычитании сигналов получается нуль, то токи смещения обоих сеток одинаковы и устройство работает правильно. Такую двойную сетку далее будем называть „сетка“ или „датчик“. Для уменьшения влияния внешних полей вокруг сетки была помещена

заземленная металлическая рама размером 0.6×0.6 m, не показанная на рис. 1.

3. Получение величины заряда из данных измерений

Сигналы, возникающие при измерении двойной сеткой, показаны на рис. 2 для отрицательного плазмоида. Во время разряда на обеих сетках наблюдаются токи *I* и *3*. Это токи смещения, возникающие от действия электрического поля поднимающегося плазмоида. В этом состоит первый результат данного исследования: поднимающийся плазмоид действительно несет заряд, поле которого создает ток смещения. Поскольку чувствительность обеих сеток к переменному полю была одинакова, токи *I* и *3* оказались одинаковыми.

При пролете плазмоида через плоскость сеток (этот момент определяли по видеосъемкам) в цепи изолированной сетки возникает ток *4*. Это ток смещения. Токи смещения *3* и *4* в цепи изолированной сетки имеют противоположные направления. Действительно, первый обусловлен увеличением поля (по модулю) во время разряда, а второй — уменьшением этого поля во время прохождения плазмоида через сетку. Как отмечено выше, это происходит из-за стекания заряда плазмоида на голую сетку.

При пролете плазмоида в цепи голой сетки регистрируется ток *2*. Как отмечалось, он является суммой тока заряженных частиц и тока смещения.

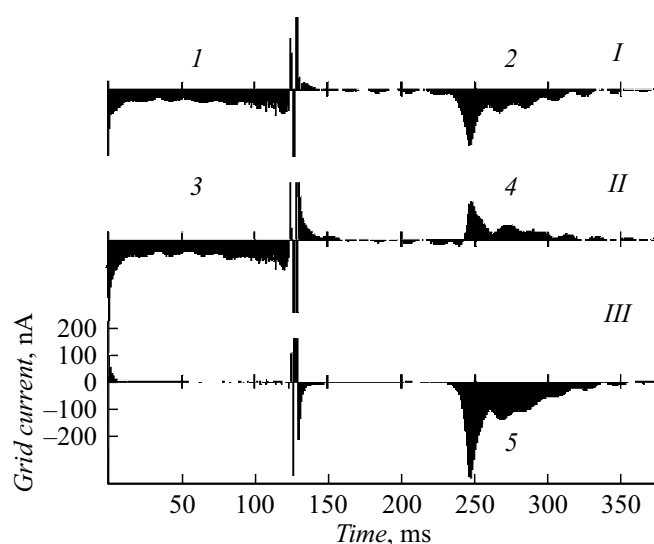


Рис. 2. Токи сеток отрицательного плазмоида. Опыт № 5022. I — ток голой сетки. Он состоит из тока смещения во время разряда (*1*) и тока, возникающего при пролете плазмоида через сетку (*2*). II — ток изолированной сетки. Он состоит из тока смещения во время разряда (*3*), и тока смещения при пролете плазмоида через сетку (*4*). III — разность токов голой и изолированной сеток. Этот график состоит только из тока заряженных частиц на голую сетку (*5*).

При обработке данных из тока голой сетки I вычитали ток изолированной сетки II. В результате получали график III. На нем остается только ток *5*. Это ток, возникающий при столкновении заряженных частиц с голой сеткой. Выше говорилось, что он является суммой дрейфового и диффузионного тока. В данном опыте наблюдается отрицательный ток и, следовательно, заряд плазмоида отрицательный. Это согласуется с тем, что потенциал центрального электрода в данном опыте был отрицательным (схема А, рис. 1). На разностном графике III остаются также короткие сигналы в моменты включения и выключения тока разряда.

На всем протяжении графиков токов сеток I и II видны колебания частотой 50 Hz. Вероятно, это токи смещения, вызванные переменным внешним полем, создаваемым электропроводкой и приборами в лаборатории. Естественно, что на разностном графике III эти колебания отсутствуют. Однако на этом графике имеются колебания сигнала такой же частоты во время прохождения плазмоида через датчик, т.е. в интервале времени 230–350 ms. Вероятно, причина этих колебаний другая — не ток смещения, а периодическое изменение дрейфового тока на голую сетку под влиянием этого внешнего электрического поля. Таким образом, внешнее поле вызывает два эффекта — токи смещения и модуляцию тока частиц на голую сетку. Анализ графиков показывает, что фазы этих двух колебаний отличаются на 90° , как это и следует из природы токов.

Особенностью тока зарядов *5* на рис. 2 является большой пик вначале, который возникает, когда плазмоид касается сетки. Этот пик имелся всегда, когда сетка была на малой высоте, и в части опытов, когда сетку помещали на средней высоте. Возможно, пик тока связан с резкой верхней границей плазмоида, обнаруженной разными методами. В работах [18,19,23] плазмоид типа А исследовали одиночным зондом Ленгмюра. Сигнал зонда также начинается с острого пика тока [18]. Резкая граница наверху плазмоида обнаруживается на видеосъемках [20,23,24] на Шлирен-фотографиях [27]. Сделаны опыты по отклонению луча лазера поднимающимся плазмоидом [25]. Автор работы [25] объясняет результаты опытов резким уменьшением температуры и скачком концентрации молекул на верхней границе плазмоида.

4. Заряды положительных и отрицательных плазмоидов

Заряды плазмоидов типов А и В измерены датчиком, представляющим две двойные сетки, расположенные одна над другой. Сигналы от сеток складывались. Вторая сетка была применена для улучшения сбора зарядов. Датчик окружен экранирующим заземленным кольцом. Датчик устанавливали на 20–38 см выше центрального электрода. Тем самым заряд измеряли в разное время

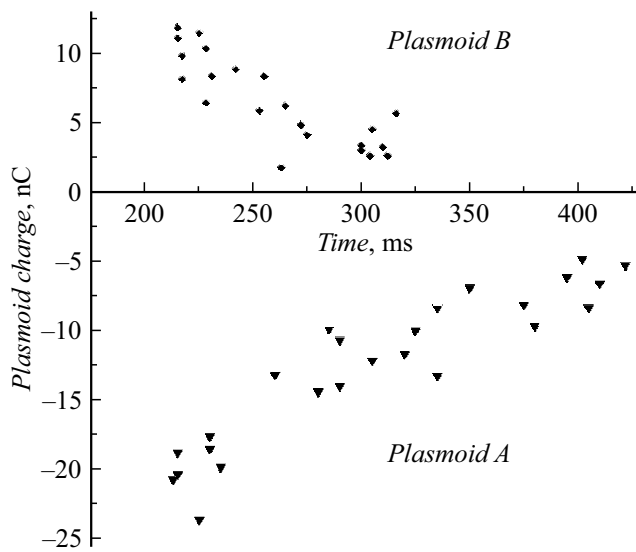


Рис. 3. Заряды плазмидов типа *A* (центральный электрод отрицательный) и плазмидов типа *B* (положительный центральный электрод) в зависимости от времени между началом разряда и максимумом тока, показанного на рис 2,(5). Разряд прекращается в момент времени 130 ms. Опыты сделаны с датчиком, состоящим из двух двойных сеток диаметром 20 см, установленными друг над другом. Сетки окружены экранирующим кольцом.

существования плазмоида. Данные измерений представлены на рис. 3.

Как и ожидалось, заряд плазмоида типа *A* отрицательный, а типа *B* — положительный. Заряд является сохраняющейся величиной, однако измеряемые заряды уменьшаются со временем. Причина этого состоит в том, что подвижность и концентрация заряженных частиц уменьшается со временем и, как следствие, уменьшается дрейфовый ток. Другая возможная причина состоит в том, что диаметр плазмоида и его отклонение от вертикали увеличиваются со временем так, что часть плазмоида проходит мимо сетки.

На рис. 3 видно, что измеренные заряды отрицательных плазмидов *A* почти в два раза больше по модулю, чем заряды положительных плазмидов *B*. Укажем возможные причины этого.

1) На конденсаторе остается различное по модулю напряжение в момент обрыва тока. Однако измерения показали, что напряжение было одинаковым и составляло 2.5 kV, поэтому эту версию следует отклонить.

2) Дрейфовый ток обусловлен разными частицами. В отрицательном разряде типа *A* ток создается дрейфом к сетке электронов и отрицательных ионов. В положительном разряде дрейфовый ток создается только движением положительных ионов. За счет значительно большей подвижности электронов дрейфовый ток в плазмиде типа *A* может быть больше, чем в плазмиде *B*, при прочих равных условиях.

3) Разница зарядов положительных и отрицательных плазмидов может быть связана с разницей их размеров. Эта версия будет обсуждена далее.

Используя результаты, представленные на рис. 3, можно оценить, какой заряд имел плазмид в момент окончания тока разряда (130 ms). Для этого кривые на рис. 3 экстраполировали. Экстраполяция показывает, что в этот момент заряд отрицательного плазмоида был около -35 нС.

Оценим объемную (избыточную) концентрацию зарядов, создающих этот заряд. Она равна (заряд плазмоида/заряд электрона)/объем плазмоида. Это составляет $0.62 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$. Таким образом, избыточная концентрация в 16000 раз меньше оцененной полной концентрации электронов $0.01 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ в момент времени 225 ms [19], о которой говорилось в разд. 2.

5. О распределении электрического заряда в плазмиде

Этот интересный вопрос изучали путем сравнения графиков тока заряженных частиц (ток 5, рис. 2) и синхронных видеосъемок тех же плазмидов. Пример для отрицательного плазмоида представлен на рис. 4.

5.1. Первое наблюдение

Сравним первые два кадра, сделанные в моменты времени 256 и 290 ms. На обоих кадрах плазмид еще не достиг сетки. В момент 256 ms тока нет, а в более поздний момент 290 ms ток есть, хотя плазмид находится еще ниже сетки на 2–3 см, т.е. ток заряженных

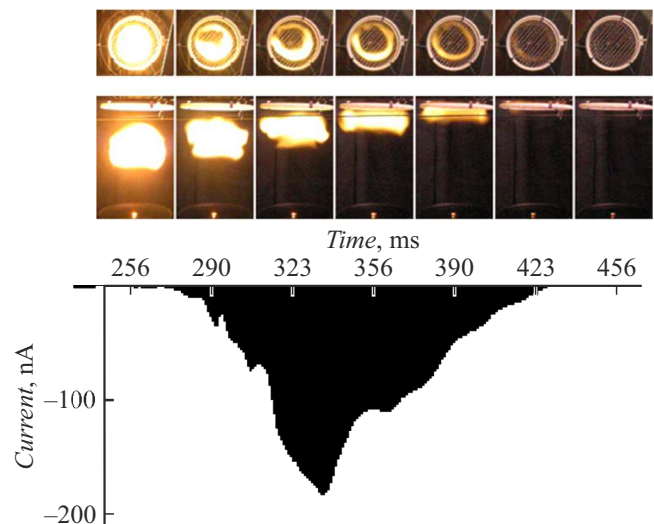


Рис. 4. График тока заряженных частиц (ток 5, рис. 2) отрицательного плазмоида (опыт № 4808) и кадры синхронной видеосъемки того же плазмоида, сделанные в моменты времени 256–456 ms от начала тока разряда. Нижняя часть каждого кадра представляет собой вид сбоку, верхняя часть — вид сверху, полученный с помощью зеркала.

частиц на сетку появился раньше, чем светящийся верх плазмоида достиг сетки. Эта закономерность была видна во всех опытах. Вероятно, электрический заряд имеется выше области свечения.

5.2. Второе наблюдение

Сравним кадры, сделанные в моменты 390, 423, 456 ms. На кадре 390 ms есть ток и есть свечение плазмоида, который находится непосредственно под сеткой. В то же время выше сетки свечения нет. На кадре 423 ms ток чрезвычайно мал и мало свечение. На кадре 456 ms нет тока и нет свечения, т.е. ток прекращается вместе с прекращением свечения. Эта закономерность видна в опытах, когда сетка была расположена на средней и большой высоте. Если сетка находилась на малой высоте, то после прекращения тока слабое свечение плазмоида еще наблюдалось выше сетки.

6. О механизме образования электрического заряда в плазмоиде

Рассмотрим этот вопрос, исходя из видеосъемок плазмоида и измерений его электрических свойств. Детальные фото плазмоида и пояснения к ним были опубликованы ранее [30,32]. Рис. 7, *j* из работы [32] послужил основой для рис. 5 настоящей работы. Кадр сделан в середине стадии тока, 60 ms.

Сразу после включения тока над центральным электродом 2 появляется ярко светящаяся плазменная струя 3. В англоязычной литературе для нее применяют термины „plasma channel“ [28] и „jet“, причем последний термин применяют чаще [9,26,29,31,35]. В отечественной литературе применяли термин „струя“ [32]. Струя

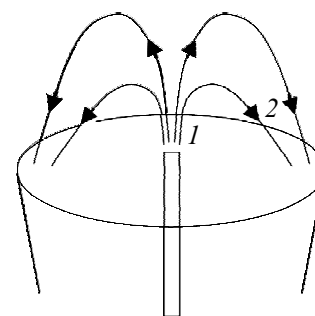


Рис. 6. Путь тока во время разряда. 1 — плазменная струя, 2 — стримеры. Этот рисунок, как и рис. 7, сделан для положительного плазмоида.

немного меняется со временем. В данный момент нижняя часть струи расширена, а верхняя часть — тонкая.

Наверху струи находится плазмоид 5. Внизу плазмоида начинаются синие стримеры 4, которые оканчиваются на воде. В литературе для них употребляют также термины „паук, паукообразная структура“ из-за их характерного вида [31]. По мере увеличения высоты плазменной струи стримеры и плазмоид также поднимаются. В работе [30] говорится, что синий цвет стримеров обусловлен излучением кальция (линия Ca I при 420 nm). Излучение плазменной струи определяется, в частности, H-альфа и радикалами OH, а желтый цвет на холодной границе плазмоида происходит от линий натрия (там же).

Как стало ясно из ранних работ, ток разряда протекает по плазменной струе, а затем через плазмоид и стримеры на воду. Путь тока показан на рис. 6. Свечение плазмы в струе значительно интенсивнее, чем в стримерах. Рис. 6 и 7 сделаны для положительного плазмоида.

В конце фазы тока стримеры сливаются в сплошную юбку. После выключения разряда плазма в юбке некоторое время светится, в то время как плазменная струя гаснет немедленно.

Сравним плотности тока в струе и в стримерах. Поперечное сечение тока в струе (примем его радиус равным радиусу электрода, т.е. 3 mm) примерно равно $\pi \cdot 3^2 \approx 28 \text{ mm}^2$, а сечение того же тока в юбке над поверхностью воды (радиус сосуда 100 mm) равно $\pi \cdot 100^2 = 31\,400 \text{ mm}^2$. Отношение площадей равно 1100. Таким образом, плотность тока, который входит в плазмоид по плазменной струе, значительно больше, чем плотность того же тока, который выходит из плазмоида по стримерам. Из сравнения плотности тока и интенсивности свечения плазмы в струе и в стримерах ясно, что объемное выделение мощности в струе значительно больше, чем в стримерах.

В съемках, приведенных в разных работах, а также, сделанных в настоящей работе, видно, что перед выключением разряда (времена 110–130 ms) плазма в юбке светится возле центрального электрода, а на периферии

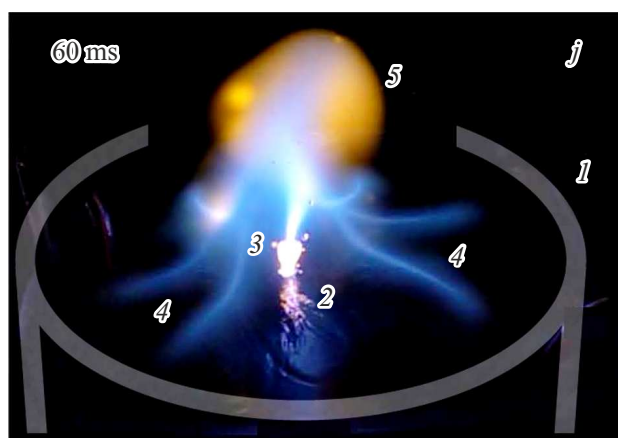


Рис. 5. Структура разряда, создающего плазмоид. Рисунок сделан по рис. 7, *j* из работы [33]. 1 — сосуд с водой, 2 — центральный электрод (его изображение искажено волнами на воде), 3 — плазменная струя над центральным электродом, 4 — стримеры, 5 — плазмоид.

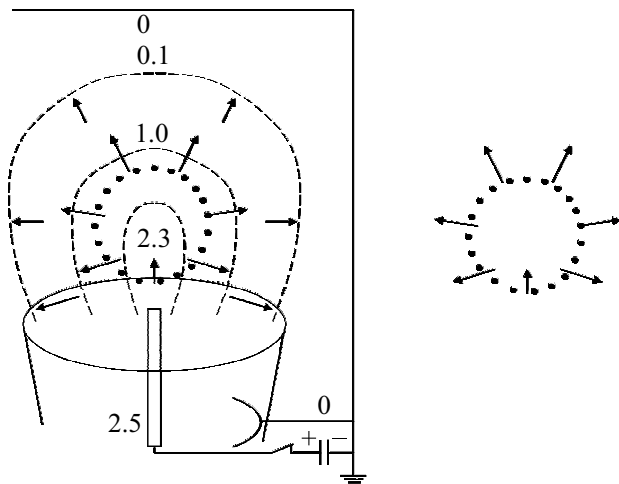


Рис. 7. Примерное распределение потенциала (в киловольтах) и электрического поля (стрелки) во время разряда. Значения потенциала 2.5 и 0.0 точные, 2.3 получено в измерениях, значения 1.0 и 0.1 — экстраполированные. Сверху упрощенно показана заземленная рама, она находится на высоте 1 м над банкой. Точками очерчена поверхность, которая используется для применения теоремы Гаусса. Справа эта поверхность с электрическими полями на ней показана отдельно.

сосуда не светится совсем. Это согласуется с малой плотностью тока в области периферии.

Примерное распределение потенциала во второй половине разряда представлено на рис. 7. Для рисунка использованы следующие данные. Потенциал окружающего оборудования (рама, измерительная сетка, кольцевой электрод) равен нулю. Центральный электрод имеет потенциал +2.5 kV перед выключением тока. Эти данные известны точно, они показаны на рисунке. Как говорилось выше, в работах [19,24] измеряли разность потенциалов между центральным электродом и плазмодом на высоте 20 см. В конце фазы тока эта величина составляла 0.2 kV. На основе этих измерений потенциал плазмоида на рис. 7 отмечен как 2.3 kV = 2.5 – 0.2 kV. Этих данных оказалось достаточно, чтобы построить примерное распределение потенциала в промежуточной области. Оказывается, основная часть приложенного напряжения падает на стримерах между плазмодом и водой.

Из данных по потенциалу и току нетрудно восстановить распределение электрического поля в конце фазы тока. Оно показано на рис. 7. Поле в плазменной струе над центральным электродом направлено внутрь плазмоида. Благодаря большому выделению мощности проводимость плазмы в струе большая, а поле небольшое. Это следует также из зондовых измерений. В то же время в стримерах и выше плазмоида поле направлено наружу плазмоида и оно больше, чем в плазменной струе. В итоговой картине распределение поля везде согласуется с распределением потенциала в соответствии с формулой $E = -\text{grad}\phi$, чего и следовало ожидать. Кроме того,

направление поля везде согласуется с направлением тока, как это и должно быть.

Суммируем. Ток, входящий в плазмод, течет по плазменной струе над центральным электродом. Здесь большая электрическая проводимость и небольшое электрическое поле. Поле направлено внутрь плазмоида. Ток, выходящий из плазмоида, течет в области большого электрического поля в стримерах. Поле направлено наружу плазмоида.

По теореме Гаусса, электрический заряд в некотором объеме пропорционален интегралу $\int E_n ds$ по замкнутой поверхности вокруг объема, где E_n — нормальная компонента поля, ds — элемент поверхности. Применим теорему к данному случаю. Построим вокруг плазмоида замкнутую поверхность, как показано точками на рис. 7. Внизу она проходит между центральным электродом и плазмодом, а сверху — над плазмодом. Интеграл состоит из двух частей, соответствующих этим двум частям поверхности с различным направлением электрического поля. Первая часть поверхности — это та, которая пересекает плазменную струю. Поле направлено внутрь плазмоида, а площадь поверхности небольшая. Вторая часть — это вся остальная поверхность, включая стримеры и область над плазмодом. Поле здесь больше и площадь этой части поверхности значительно больше. Поэтому интеграл определяется второй частью. Интеграл по всей поверхности не равен нулю, это означает, что плазмод имеет электрический заряд.

Эта ситуация относится ко второй половине токовой фазы. Измерения показывают, что заряд существует и в автономной фазе. Следует понять, почему после выключения разрядного тока заряд плазмоида не стекает на тот или другой электрод.

Ток течет по цепи: высоковольтный полюс конденсатора–выключатель–центральный электрод–плазменная струя–плазмод–стримеры (в конце разряда они выглядят как юбка)–вода–заземленный кольцевой электрод. Действие выключателя состоит в том, что он вносит большое и быстро возрастающее сопротивление между центром плазмоида и высоковольтным полюсом конденсатора (рис. 1). Ток разряда уменьшается. Плазма на пути тока остывает. Плазменная струя над центральным электродом остывает быстрее всего, поскольку она имеет небольшой диаметр и большую температуру. Проводимость здесь быстро уменьшается. В то же время плазма в юбке остывает медленнее, так как ее объем большой, а температура сравнительно небольшая. В конце концов, сопротивление между плазмодом и высоковольтным выводом конденсатора становится большим. Плазмод сохраняет заряд. Можно сказать, что сохранение заряда имеет место из-за быстрого увеличения сопротивления на пути тока на участках: плазма в выключателе, плазменная струя, плазмод, плазма в стримерах.

7. Сравнение измеренного заряда с зарядом в модели плазмоида

Таким образом, заряд плазмоида измерен в разное время его существования. Экстраполяция полученных данных к моменту обрыва тока разряда показывает, что отрицательный плазмоид имеет заряд около -35 нС в этот момент. Выше был оценен потенциал плазмоида в этот момент. Радиус плазмоида можно определить из фотографий. Выше показано, что радиус распределения заряда на 2 см больше, чем радиус плазмоида. Таким образом, радиус распределения заряда в плазмоиде также может быть оценен. Теперь можно сопоставить независимо измеряемые заряд плазмоида, радиус распределения заряда плазмоида и потенциал центрального электрода, если принять модель, что плазмоид и окружающее заземленное оборудование являются сферическим конденсатором.

По определению сферический конденсатор состоит из двух сферических обкладок и диэлектрика между ними. Параметры заряженного конденсатора описываются формулой

$$Q = \varphi \varepsilon / (1/R_1 - 1/R_2) / k,$$

где Q — заряд конденсатора, φ — разность потенциалов между обкладками, ε — относительная электрическая проницаемость диэлектрика между пластинами, R_1, R_2 — радиусы внутренней и внешней сферической обкладки конденсатора, константа $k = 1/4\pi\varepsilon_0$, ε_0 — электрическая постоянная. Численно $k = 9 \cdot 10^9$ В·м/С.

В данном случае внутренняя обкладка представляет собой плазмоид с радиусом (точнее радиусом распределения заряда) R_1 .

В частном случае радиус внешней обкладки может быть значительно больше, чем радиус внутренней обкладки, или бесконечным. Тогда величиной $1/R_2$ можно пренебречь. В данном случае внешняя обкладка не сферическая, а состоит из таких предметов, как кольцевой электрод, заземленные провода силовой и измерительной системы, заземленные провода лаборатории, рама. Расстояние до них составляет 0.5 – 2 м, т.е. R_2 в 5 – 20 раз больше, чем R_1 . Пренебрежем величиной $1/R_2$, которая оказывается мала по сравнению с $1/R_1$. Тогда формула параметров заряженного конденсатора имеет вид $Q = \varphi \varepsilon R_1 / k$.

При протекании тока разряда конденсатор заряжается, поскольку внутренняя обкладка конденсатора, т.е. плазмоид, соединена проводником (плазменной струей) с высоковольтным центральным электродом. В автономной фазе это соединение исчезает, и сферический плазмоид становится электрически изолированным.

Оценки заряда и потенциала сделаны выше. Судя по снимкам, радиус свечения плазмоида в момент обрыва тока составлял около 7.5 см. Анализ, проведенный в разд. 5, показал, что при временах 300 мс и более распределение заряда в плазмоиде больше, чем распределение свечения, примерно на 2 см. С учетом этого

радиус распределения заряда равен

$$R_1 = 7.5 \text{ см (радиус свечения)} + 2 \text{ см} = 9.5 \text{ см.}$$

Подставляя величины φ и R_1 в формулу конденсатора $Q = \varphi \varepsilon R_1 / k$, получаем, что оцененный таким образом заряд равен -24.3 нС. Это значение следует сравнить с зарядом -35 нС, экстраполированным по экспериментальным данным (рис. 3). Учитывая неопределенности, допущения, а также то, что речь идет о новом явлении, согласие неплохое.

В модели плазмоида, как сферического конденсатора, заряд плазмоида пропорционален его радиусу при равных потенциалах. Выше говорилось, что размеры отрицательных плазмоидов больше размеров положительных. Вероятно, это одна из причин, почему заряды отрицательных плазмоидов оказались больше, чем положительных.

Основываясь на полученных данных о заряде, сделаем оценку электрического поля на поверхности плазмоида в момент окончания тока, т.е. 130 мс. Радиус распределения заряда R_1 был оценен выше. По этим экспериментальным данным получаем, что поле $E = Q \cdot k / (R_1)^2 = 35 \cdot 10^{-9} \cdot 9 \cdot 10^9 / (0.095)^2 \cong 35$ кВ/м. Это значение следует сравнить с полем пробоя при нормальных условиях, которое составляет 3000 – 3300 кВ/м. Как видно, поле на поверхности плазмоида в 86 – 94 раз меньше пробойного. Этот результат согласуется с тем, что вокруг плазмоида не наблюдаются искры или иные разряды.

8. Обсуждение и заключение

Продолжено исследование долгоживущего плазмоида, возникающего в атмосфере при высоковольтном разряде над поверхностью воды. Электрический заряд плазмоида, обнаруженный ранее, исследован более детально. Для измерения заряда использовали модифицированный зонд Ленгмюра. Зонд выполнен в виде проволоочной сетки, которая установлена на траектории поднимающегося плазмоида. Сетка собирает заряженные частицы за счет их дрейфового движения в электрическом поле, которое создает заряд плазмоида, а также за счет диффузионного движения частиц. Информацию о заряде дает дрейфовый ток. Если дрейфовый ток много больше диффузионного, то заряд плазмоида равен интегралу тока за время прохождения плазмоида через сетку. В процессе исследования выяснилось, что имеет место также ток смещения. Он создается электрическим полем плазмоида и полями лабораторных приборов. Для учета тока смещения использована дополнительная сетка, которая измеряет ток смещения. Эта сетка выполнена из изолированного провода. Заземленным (опорным) электродом для сеток является кольцевой электрод, находящийся в воде.

Как и ожидалось, знак измеренного заряда плазмоида совпадает со знаком потенциала центрального электрода относительно заземленного кольцевого электрода. Хотя

заряд является сохраняющейся величиной, оказалось, что чем выше сетка над водой, тем меньше измеренный заряд. Причина этого состоит в уменьшении подвижности и концентрации заряженных частиц со временем, что приводит к уменьшению дрейфового тока.

Из полученных данных путем экстраполяции оценен заряд Q отрицательного плазмоида в момент выключения тока разряда. Заряд составляет около -35 нС. Этот экстраполированный заряд, радиус распределения заряда в плазмоиде R_1 и потенциал центрального электрода φ (все величины относятся к моменту обрыва тока) представляют собой независимо измеряемые величины. Оказалось, что эти величины примерно удовлетворяют формуле $Q = \varphi \cdot R_1/k$, которая описывает параметры заряженной сферы — частного варианта сферического конденсатора, радиус наружной обкладки которого значительно больше радиуса внутренней.

Выполненное исследование позволяет говорить о механизме образования заряда плазмоида. Покажем, что заряд образуется во время протекания тока разряда. Для выяснения механизма применим теорему Гаусса.

Ток разряда идет с центрального электрода в плазмоид через яркую плазменную струю. Из плазмоида ток течет по стримерам на воду. Плотность тока на этом пути различна. Струя имеет небольшой диаметр. Ток в ней идет через эмиссионную плазму (наблюдались линии ионов металла электрода). Плотность тока большая, температура плазмы и ее проводимость — высокая. Электрическое поле небольшое и направлено внутрь плазмоида (для положительного плазмоида). Из плазмоида на воду ток течет по стримерам, которые имеют большое поперечное сечение. Плотность тока в стримерах мала, проводимость плазмы мала, сравнительно с этими параметрами в струе. Электрическое поле направлено наружу плазмоида и оно больше, чем поле в струе. Над плазмоидом поле направлено также наружу, о чем говорят измерения потенциала. Зная распределение электрического поля, можно оценить интеграл от нормальной компоненты поля по некоторой замкнутой поверхности, окружающей плазмоид. Для оценки важно, что сечение тока и величина поля в стримерах значительно больше, чем эти параметры в плазменной струе. Следовательно, интеграл определяется той частью поверхности, в которой поле направлено наружу плазмоида. Это поверхность сбоку плазмоида (которая пересекает стримеры) и наверху плазмоида. Очевидно, что интеграл не равен нулю. Иначе говоря, плазмоид несет электрический заряд.

После выключения тока разряда плазма в плазменной струе над центральным электродом быстро остывает, так как объем ее небольшой, а температура большая. Проводимость между плазмоидом и электродом исчезает. Поэтому заряд плазмоида не стекает на центральный электрод.

Выполненное исследование позволит подбирать условия экспериментов так, чтобы влиять на электрический

заряд плазмоида. Возможно, при увеличении напряжения разряда можно получить плазмоид с большим зарядом, конечно, при условии, что выполнена закономерность, которая выявлена в настоящей работе: электрическое сопротивление плазменной струи значительно меньше, чем сопротивление стримеров.

Данное исследование добавляет аргументы к предположению, что электрический заряд является общим свойством шаровой молнии и плазмоида. Также данное исследование ставит вопрос о связи между электрическими и газодинамическими свойствами плазмоида. Этот сложный вопрос не мог быть рассмотрен в рамках проведенного исследования.

В заключение. Плазмоид представляет собой, на наш взгляд, заряженное облако эрозионной плазмы, существующее длительное время в атмосфере.

Благодарности

Автор благодарит А.В. Арутюняна и Г.Д. Шабанова за постоянные обсуждения работы, С.Р. Гурина и А.П. Роганова за помощь в изготовлении оборудования, А.А. Ваганова за инициативу в проведении дополнительных экспериментов и участие в них.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Дж. Барри. *Шаровая молния и четочная молния* (Мир, М., 1983) [J.D. Barry. *Ball Lightning and Bead Lightning* (Plenum, NY., 1980)]
- [2] В.Н. Кунин. *Шаровая молния на экспериментальном полигоне* (Гос. университет, Владимир, 2000)
- [3] Л.В. Фуров. *ЖТФ*, **75** (3), 98 (2005). [L.V. Furov. *Tech. Phys.*, **50** (3), 380 (2005). DOI: 10.1134/1.1884742]
- [4] G.S. Paiva, A.C. Pavao, E. Alpes de Vasconcelos, O. Mendes, Jr., E. Felisberto da Silva Jr. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 048501 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.048501
- [5] Г.Д. Шабанов, А.Г. Крившич, Б.Ю. Соколовский, О.М. Жеребцов. *Труды междунар. конф. Естественные и антропогенные аэрозоли* (СПб., 2001), т. 3, с. 368.
- [6] Г.Д. Шабанов. Письма в *ЖТФ*, **28** (4), 81 (2002). [G.D. Shabanov. *Tech. Phys. Lett.*, **8** (2), 164 (2002). DOI: 10.1134/1.1458524]
- [7] А.И. Егоров, С.И. Степанов. *ЖТФ*, **72** (12), 102 (2002). [A.I. Egorov, S.I. Stepanov. *Tech. Phys.*, **47** (12), 1584 (2002). DOI: 10.1134/1.1529952]
- [8] А.И. Егоров, С.И. Степанов, Г.Д. Шабанов. *УФН*, **174** (1), 107 (2004). DOI: 10.3367/UFNr.0174.200401g.0107 [A.I. Egorov, S.I. Stepanov, G.D. Shabanov, *Phys. Usp.*, **47** (1), 99 (2004). DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/PU2004v047n01ABEH001691>]
- [9] R. Friedl, U. Fantz, I. Pilottek, D. Schmid, S. Steibel. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **54**, 095205 (2021). DOI: 10.1088/1361-6463/abc918

- [10] V.L. Bychkov, S.V. Anpilov, N.P. Savenkova, V. Stelmashuk, P. Hoffer. *J. Physics: Conf. Series*, **996**, 012012 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/996/1/012012
- [11] В.Л. Бычков. *Естественные и искусственные шаровые молнии в атмосфере Земли* (Макс Пресс, М., 2021), DOI: 10.29003/m2009.978-5-317-06572-0
- [12] J.R. Powell, D. Finkelstein. *Adv. Geophys.*, **13**, 141 (1969).
- [13] M.L. Shmatov, K.D. Stephan. *J. Atmos. Sol.-Ter. Phys.*, **195**, 105115 (2019).
- [14] И.П. Стаханов. *О физической природе шаровой молнии* (Энергоатомиздат, М., 1985)
- [15] А.И. Григорьев, С.О. Ширяева, Н.А. Петрушов. *ЖТФ*, **86**(9), 39 (2016). [A.I. Grigor'ev, S.O. Shiryayeva, N.A. Petrushov. *Tech. Phys.*, **61**(9), 1319 (2016). DOI: 10.1134/S1063784216090085]
- [16] М.Т. Дмитриев. *ЖТФ*, **39**(2), 387 (1969).
- [17] M.L. Shmatov. *J. Plasma Phys.*, **69**(6), 507 (2003). DOI: 10.1017/S002237780300237X
- [18] А.И. Егоров, С.И. Степанов. *ЖТФ*, **78**(6), 15 (2008). [A.I. Egorov, S.I. Stepanov. *Tech. Phys.*, **53**(6), 688 (2008). DOI: 10.1134/s1063784208060029]
- [19] A. Versteegh, K. Behringer, U. Fantz, G. Fussmann, D. Jutter, S. Noack. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **17**, 024014 (2008). DOI: 10.1088/0963-0252/17/2/024014
- [20] С.И. Степанов. *ЖТФ*, **84**(1), 109 (2014). [S.I. Stepanov, *Tech. Phys.*, **59**(1), 107 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214010198]
- [21] Г.А. Кукеев. *Проектирование выключателей переменного тока высокого напряжения* (Госэнергоиздат, М.–Л., 1961)
- [22] Y. Sakawa, K. Sugiyama, T. Tanabe, R. More. *Plasma and Fusion Research.*, **1**, 039 (2006). DOI: 10.1585/pfr.1.039
- [23] B. Juettner, S. Noack, A. Versteegh, G. Fussmann. *Long-Living Plasmoids from a Water Discharge at Atmospheric Pressure. Proc. 28th ICPIG* (Prague, Czech Republic, 2007), July 15–20, p. 2229–34
- [24] A. Versteegh. *Master Thesis* (Technische Universiteit, Eindhoven, 2007)
- [25] S. Noack. *Diploma Thesis* (Universitat Leipzig, Leipzig, 2008)
- [26] K.D. Stephan, Sh. Dumas, L. Komala-Noor, J. McMinn. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **22**, 025018 (2013). DOI: 10.1088/0963-0252/22/2/025018
- [27] D.M. Friday, P.B. Broughton, T.A. Lee, G.A. Schutz, J.N. Betz, C.M. Lindsay. *J. Phys. Chem. A*, **117**(39), 9931 (2013). DOI: 10.1021/jp400001y
- [28] U. Fantz, S. Kalafat, R. Friedl, S. Briefi. *J. Appl. Phys.*, **114**, 043302 (2013). DOI: 10.1063/1.4816311
- [29] D.M. Friday. *Master Thesis* (University of Illinois, Urbana, 2014)
- [30] U. Fantz, S. Briefi, R. Friedl, M. Kammerloher, J. Kolbinger, A. Oswald. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **42**(10), (2014). DOI: 10.1109/tps.2014.2310128
- [31] S.C. Dubowsky. *Doctor Dissertation* (University of Illinois, Urbana, 2018)
- [32] S. Zhao, C. Yuan, А.А. Кудрявцев, О.М. Жеребцов, Г.Д. Шабанов. *ЖТФ*, **91**(7), 1108 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.07.50952.342-20 [S. Zhao, C. Yuan, А.А. Kudryavtsev, O.M. Zherebtsov, G.D. Shabanov. *Tech. Phys.*, **66**(9), 1058 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221070173
- [33] S.E. Dubowsky, D.M. Friday, K.C. Peters, Z. Zhao, R.H. Perry, B.J. McCall. *Intern. J. Mass Spectrometry*, **376**, 39 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jims.2014.11.011>
- [34] C.J.V. Wurden, G.A. Wurden. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **39**(11), 2078 (2011). DOI: 10.1109/TPS.2011.2155090
- [35] S.E. Dubowsky, A.N. Rose, N.G. Glumac, B.J. McCall. *Plasma*, **3**(3), 92 (2020). DOI: 10.3390/plasma3030008
- [36] S.E. Dubowsky, B. Deutsch, R. Bhargava, B.J. McCall. *J. Molecular Spectroscopy*, **322**, 1 (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jms.2016.02.005>
- [37] M. Jacobs, W. Gekelman, P. Pribyl, Y. Qian, S. Abarzhi. *Phys. Plasmas*, **28**, 052114 (2021). DOI: 10.1063/5.0040880
- [38] U. Fantz, S. Briefi, R. Friedl, M. Kammerloher, A. Oswald, D. Rauner. *30th ICPIG*, August 28th — September 2nd 2011, Belfast, Northern Ireland, UK.
- [39] V. Stelmashuk, P. Hoffer. *IEEE Transaction on Plasma Science*, **45**(12), 3160 (2017). DOI: 10.1109/TPS.2017.2770224