

Краткие сообщения

04;12

Плазменные факелы и электрофизические параметры диафрагменного разряда в воде

© Н.И. Фальковский, И.В. Божко

Институт электродинамики НАН Украины,
03680 Киев, Украина
e-mail: lerdep7@ied.org.ua

(Поступило в Редакцию 29 августа 2007 г.)

Исследованы формирование плазменных факелов, напряжения, токи, распределения мощности, изменения сопротивлений сравнительно мало изученного диафрагменного разряда в воде и растворах соли при малых энергиях разряда (до 10 J). Плазменные образования диафрагменного разряда имеют существенные отличия от факелов разрядов другого вида. Наблюдались разная форма анодных и катодных факелов, пробои между диафрагмой и одним из электродов, особая форма катодного пробоя. Установлен характер влияния удельной электрической проводимости среды на параметры изменения плазменных образований, импульсов тока, электрическую прочность среды, изменение формы импульсов тока при „полупробоях“ и др. На основании анализа экспериментальных данных сделан вывод о процессе поджига диафрагменного разряда, который отличается от принятого в литературе.

PACS: 52.80.Wq

Введение

Привлекательное своеобразие диафрагменного разряда (ДфР) заключается в кажущейся несвязности его плазменных образований с электродами. Он возникает вдали от электродов в зоне небольшого отверстия в тонкой диафрагме, разделяющей два объема воды, к которым подводится импульсное напряжение. Количество работ по ДфР немногочисленно. В работе [1] описан процесс возникновения такого разряда, принятый в литературе в настоящее время. Свойства плазмы ДфР большой энергии (1500 J) оценены в работе [2] по исследовавшейся яркостной температуре факелов. Пространственные плазменные образования ДфР малой энергии (до 10 J) описаны в [3].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального изучения электрофизических особенностей ДфР в сочетании с его плазменными проявлениями.

Экспериментальная установка

Установка состояла из прозрачного оргстеклянного сосуда, наполнявшегося водой, источника импульсного напряжения и измерительных устройств: осциллографа, делителя напряжения, токового шунта, цифрового фотоаппарата [3]. Сосуд для воды был разделен пополам стеклотекстолитовой диафрагмой D толщиной $b = 0.48$ mm. Диаметр отверстия в диафрагме $d = 2r_0 = 0.5$ mm. Медные стержневые электроды диаметром 4 mm располагались по обе стороны диафрагмы D параллельно ей и напротив отверстия. Рабочее расстояние от диафрагмы

до поверхности каждого из электродов (анодное расстояние l_A и катодное l_K) — 10 mm, т.е. номинальное рабочее расстояние между электродами составляло $l_{IE} = l_A + l_K + b = 20.5$ mm. Энергия источника питания (начальное напряжение $U_0 = 12$ kV и емкость батареи конденсаторов $C = 0.1$ μ F) оставалась неизменной, поскольку основной целью было выяснение влияния именно условий разряда на свойства и параметры ДфР. Исследования велись при различных удельных электрических проводимостях σ среды: в чистой (водопроводной) воде ($\sigma = 0.55 \cdot 10^{-4}$ S/cm), в 5-миллиномальном (5 mm) растворе соли NaCl ($0.60 \cdot 10^{-3}$) и в 5-сантиметровом (5 cm) растворе ($0.55 \cdot 10^{-2}$).

Результаты экспериментов

Плазменные образования (факелы) ДфР своеобразны и отличаются, например, от факелов коронного разряда под водой [4]. Необычно также их полярное развитие: в анодном промежутке l_A анодом служит отверстие, а не анод, и факел от отверстия диафрагмы развивается на анод, как на катод. Катодный факел в промежутке l_K развивается соответственно от отверстия на стержень-катод, как на анод (рис. 1, *a*). При малом значении σ анодные факелы стримерные. Стримеры развиваются в произвольном направлении полупространства, а не обязательно в сторону анода, как следовало бы ожидать (рис. 1, *a*). Катодные факелы неправильной полусферической формы. С ростом σ катодные факелы сильно увеличиваются в размерах, анодные — уменьшаются (рис. 1).

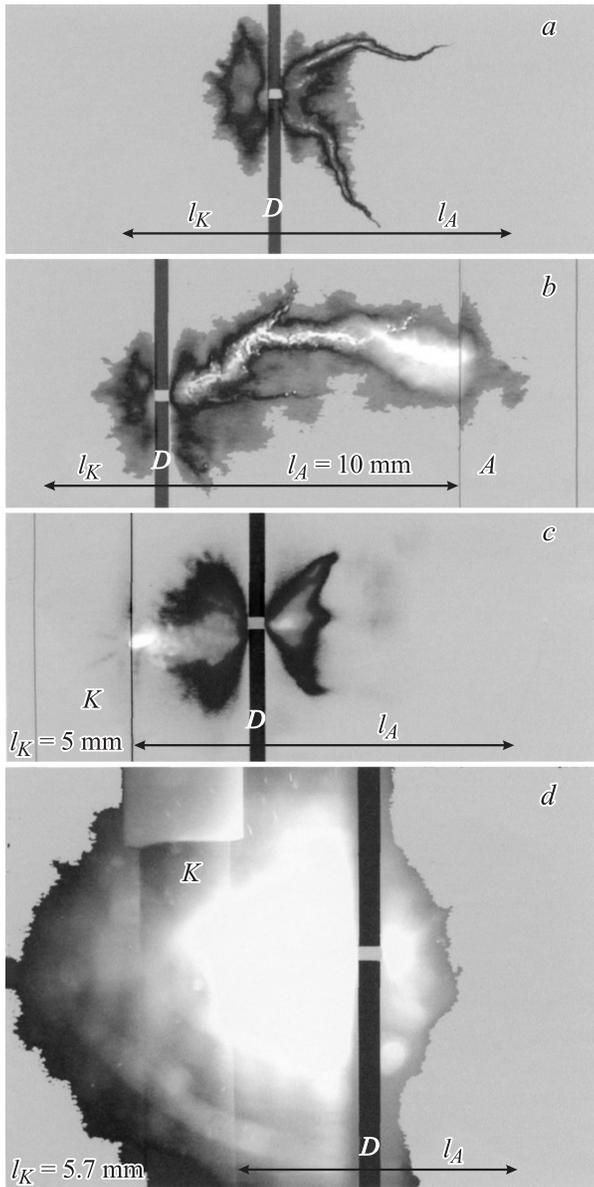


Рис. 1. Снимки ДфР вдоль диафрагмы D : a, b — в чистой воде, c — в 5 мН растворе NaCl, d — в 5 мН растворе; a — без пробоя, $b-d$ — с „полупробоем“ на электрод.

„Полупробои“

Как оказалось, в ДфР возможен режим „полупробоя“, т.е. после возникновения факелов может происходить пробой анодного l_A или катодного l_K промежутка без пробоя всего междуэлектродного расстояния l_{IE} . В анодной области факел при этом преобразуется в контрагированный линейный канал пробоя обычного вида, как и при пробое между металлическими электродами (рис. 1, b). Пробой в катодной области в чистой воде и 5 мН растворе происходит в необычной форме: большая часть катодного промежутка l_K от отверстия перемыкается распределенным в пространстве катодным

факелом и только его вершина замыкается коротким контрагированным каналом на катод (рис. 1, c). В 5 мН растворе катодный пробой представляет собой диффузное перекрытие промежутка непосредственно самим факелом (рис. 1, d). Указанные пробои позволили установить, что с ростом проводимости воды электрическая прочность среды в анодной области растет, а в катодной, наоборот — падает. Это выразилось в том, что при одном и том же $U_0 = 12$ кВ пробиваемое анодное расстояние l_A от значения величины 10 мм в чистой воде уменьшилось до 2.5 мм в 5 мН растворе. Пробиваемое катодное расстояние l_K с ~ 4 мм в чистой воде увеличилось до ~ 7 мм в 5 мН растворе. Такое изменение прочности с разных сторон диафрагмы, т.е. при разных полярностях напряжения, качественно согласуется с известными данными исследований в промежутках с металлическими электродами [4].

Осциллограммы напряжения и тока при разряде в чистой воде (рис. 2) представляют собой плавные кривые. Небольшой кратковременный провал напряжения в области амплитуды импульса напряжения $U(t)$, обозначенный буквой a , и соответствующий ему также небольшой всплеск тока a в начале импульса тока $I(t)$ свидетельствуют о начале собственно диафрагменного разряда. Возрастание кривой $I(t)$ под действием напряжения $U(t)$ до всплеска a соответствует проводимости σ и изменению ее при нагреве воды протекающим током в области отверстия диафрагмы перед его пробоем. Это время составляет в данных условиях внушительную величину — около $40 \mu\text{s}$ при общей длительности импульсов $I(t)$ и $U(t)$ почти $700 \mu\text{s}$. Изменение мощности разряда $P(t) = U(t)I(t)$ также отражается плавной кривой. Сопротивление разрядной цепи $R(t) = U(t)/I(t)$ в области разряда снижается до общего значения порядка $2 \text{ k}\Omega$ при максимуме тока. Такой вид кривых соответствует ДфР с развитием распределенных в объеме факелов по обе стороны диафрагмы (рис. 1, a).

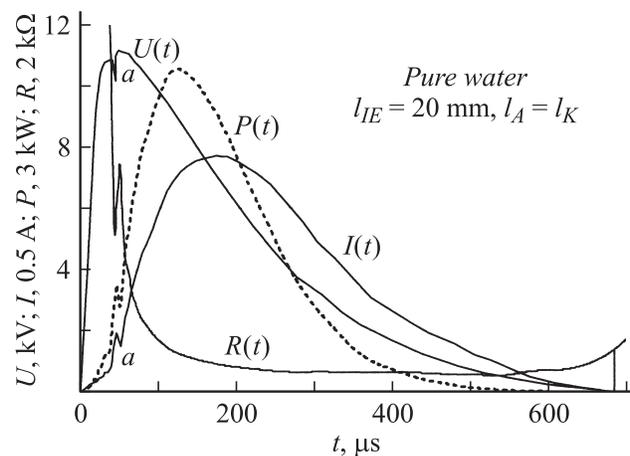


Рис. 2. Изменение во времени t напряжения U , тока I , мощности P и сопротивления R в ДфР в чистой воде.

Кривые импульсов тока при „полупробоях“ существенно изменяются (рис. 3). В момент „полупробоя“ происходит значительный скачок тока b , составляющий около 20–60% от амплитуды импульса тока 2. Качественно импульсы тока при „полупробоях“ на анод (кривая 2) и на катод (кривые 5, 6) подобны. Сопротивление разряда $R(t)$ при пробое как анодного l_A , так и катодного l_K промежутков скачком b падает почти вдвое по сравнению с режимом разряда без „полупробоя“ (кривая 3). Сравнение кривых тока $I(t)$ различных разрядов 2, 5, 6 показывает, что „полупробой“ на электроды происходит с большой задержкой во времени по отношению к началу импульса $I(t)$. Практически всегда „полупробой“ наступает после амплитуды тока, а по отношению к импульсу напряжения 1 — даже после его полуспада. При этом, чем короче расстояние диафрагма-электрод, тем раньше наступает пробой, больше амплитуда скачка и короче импульс $I(t)$ (кривые 5, 6). Так, при пробое $l_K = 3.7$ mm длительность импульса тока (кривая 5) составляет $500 \mu s$ против импульса $680 \mu s$ без „полупробоев“ (кривая 4). Время задержки пробоя имеет высокую чувствительность к изменению катодного расстояния l_K . Например, при увеличении l_K всего на 0.4 mm время запаздывания пробоя увеличилось на $80 \mu s$ (кривые 5, 6). Указанные трансформации формы импульсов $I(t)$ понятны, поскольку соответствуют обычным процессам в разряде. Позднее развитие „полупробоев“ (на далеком спаде импульсов $U(t)$ и $I(t)$, рис. 3) указывает на то, что эти состояния пробоя образуются вследствие перегрева факела и контракции его в канал разряда, а не из-за перенапряжения в факеле.

Импульсы тока ДФР в растворах по форме подобны импульсам в чистой воде, но существенно отличны от них количественно (рис. 4). Характерно, что все кривые не содержат начального участка нарастания тока до

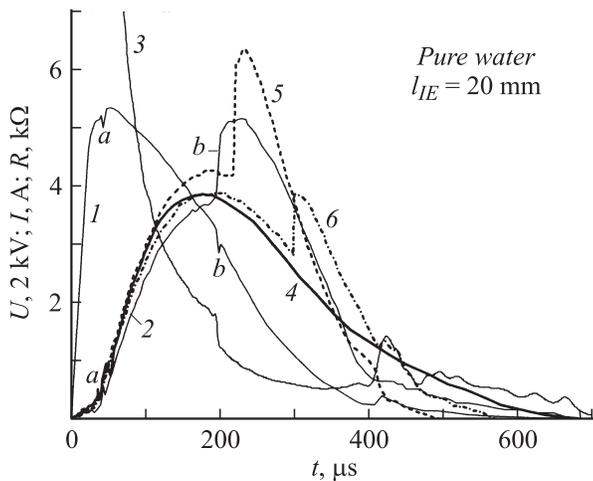


Рис. 3. Импульсы ДФР при „полупробое“ в чистой воде на анод: 1 — $U(t)$, 2 — $I(t)$, 3 — $R(t)$ при $l_A = 10$ mm; на катод: 5 — $I(t)$ при $l_K = 3.7$ mm, 6 — 4.1; без пробоя: 4 — $I(t)$ при $l_A = l_K$.

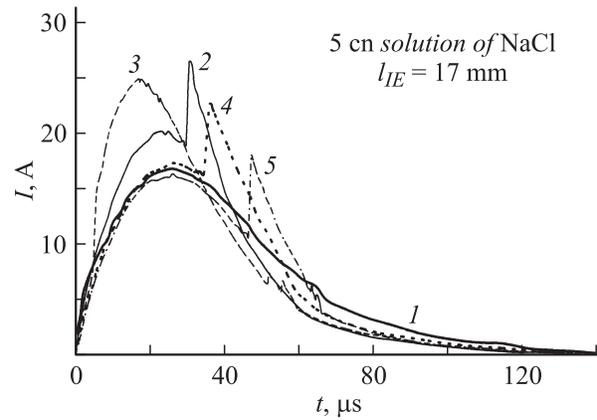


Рис. 4. Импульсы тока ДФР при „полупробоях“ в 5% растворе: 1 — без пробоя; 2 — пробой на анод при $l_A = 2.5$ mm; 3–5 — пробой на катод при $l_K = 4$ mm (3), 5 (4), 6 (5).

пробоя, подобного тому, что наблюдается на кривых $I(t)$ в чистой воде (точка a , рис. 2, 3). Амплитуды импульсов тока (см., например, кривую 1), выросли в среднем более, чем в 4 раза, а их длительность соответственно уменьшилась в 4 раза, составив $\sim 160 \mu s$ против $680 \mu s$ в чистой воде. Пробои на анод, ставшие возможными в растворе, как отмечалось, только на коротких анодных расстояниях l_A , даже при $l_A = 2.5$ mm, происходят, как и в чистой воде, только после амплитуды тока (кривая 2). Катодные пробои стали возможными по времени и до амплитуды импульса тока, на его фронте (кривая 3), а также при катодных расстояниях ($l_K = 4–6$ mm) бóльших, чем в чистой воде. Последнее связано, как отмечалось, с падением электрической прочности в катодной области в растворах и увеличением — в анодной. Уменьшение длительности импульсов тока из-за пробоев на электроды не столь значительное, как в чистой воде, примерно одинаковое при всех временах задержки пробоев и составляет $\sim 20 \mu s$.

Обсуждение результатов

Формирование пробоя

Считается, что разряд в отверстии диафрагмы начинается после испарения в нем воды и последующего пробоя паров [1]. Наличие экспериментальных данных в данной работе позволяет количественно оценить такой процесс. Начальный ток между электродами соответствует геометрическим параметрам разрядного промежутка и σ . В чистой воде, например, сопротивление отверстия при указанных выше параметрах составит

$$R_0 = b/\pi r_0^2 \sigma \sim 445 \text{ k}\Omega. \quad (1)$$

Сопротивление воды $R(r)$ относительно отверстия как полусферического электрода радиусом r_0 в полусферическом промежутке с внешним электродом радиусом r

будет

$$R(r) = (r - r_0)/2\pi\sigma r r_0$$

или

$$R(r_0) = 1/2\pi\sigma r_0 \sim 115 \text{ k}\Omega \text{ при } r \gg r_0. \quad (2)$$

Значение сопротивления цилиндрического электрода радиусом k и длиной l относительно воды в данном случае будет наименьшим в междуэлектродном промежутке:

$$R_e = [\ln(2l/k) - 1]/2\pi l\sigma \sim 2 \text{ k}\Omega. \quad (3)$$

Таким образом суммарное междуэлектродное сопротивление имеет значение $R_{IE} = R_0 + 2R(r_0) + 2R_e \sim 680 \text{ k}\Omega$, и при напряжении $U_0 = 12 \text{ kV}$ начальный ток составит всего $I \sim 18 \text{ mA}$. Соответственно время испарения воды в отверстии t_v будет

$$t_v = Q_v/P_o \sim 1.6 \text{ ms}$$

при

$$Q_v = c_v m \text{ и } Q_o = P_o t_v = I^2 R_o t_v, \quad (4)$$

где Q_v — энергия, требуемая для испарения воды в отверстии, c_v — удельная энергия испарения воды от 20°C , m — масса воды в отверстии, Q_o и P_o — электрические энергия и мощность в отверстии. Время t_v можно считать временем формирования пробоя отверстия.

Реальное время поджига разряда в отверстии имеет значение, в 40 раз меньшее: $\sim 40 \mu\text{s}$ (рис. 2, 3). Такое значительное различие, несмотря на грубость оценки, указывает на то, что возникновение ДфР как испарение воды в отверстии с последующим электрическим пробоем паров сомнительно. Надо полагать, что пробой в отверстии в воде начинается с образования нитеобразного канала, как и при пробое в газовых и конденсированных средах между металлическими электродами. На это косвенно указывает малое значение скачков тока и напряжения a на осциллограммах при поджиге ДфР (рис. 2, 3), свидетельствующее о слабочности начального канала пробоя и соответственно о сравнительно небольшом снижении сопротивления при пробое.

О возможности образования начального нитеобразного канала пробоя свидетельствуют и прямые снимки разряда в отверстии, выполненные перпендикулярно прозрачной диафрагме (рис. 5). Из рис. 5, *a, b* видно, что разряды 2 начинаются на стенке отверстия 1 и там же могут заканчиваться. Даже плазма за все время развития разряда, не только пар начальной стадии, не всегда заполняет отверстие. Зоны 3 остаются свободными от плазмы. Из этого следует, что для начала диафрагменного разряда вовсе не обязательно заполнение отверстия парами воды. Надо полагать, что разряд независимо от диаметра отверстия всегда начинается на его стенке. Заполнение отверстия не парами воды, а уже плазмой происходит в процессе развития разряда. При данной энергии ($\sim 7 \text{ J}$) оно полностью заполняется при диаметре $d \leq 1 \text{ mm}$ (рис. 5, *c, d*). Кроме того, на рис. 5, *a, b*

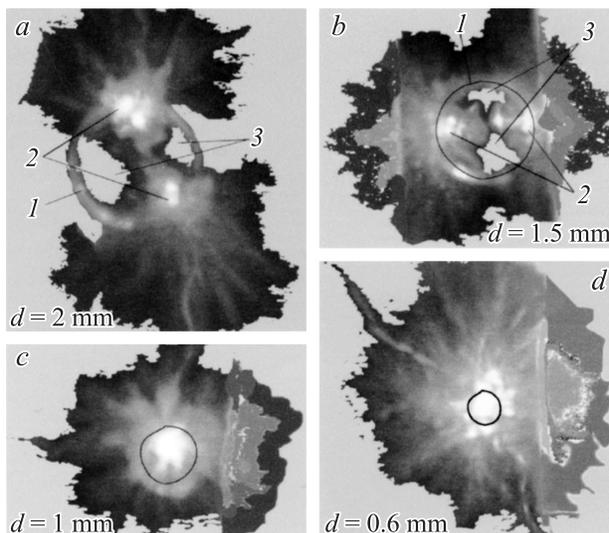


Рис. 5. Снимки ДфР перпендикулярно к прозрачной диафрагме D в чистой воде: 1 — граница отверстия, 2 — центры разряда, 3 — зоны без плазмы.

видно, что по периметру отверстия может происходить сразу несколько ДфР.

Многоточечность пробоя и одновременное развитие разрядов во всех точках пробоя является отличительной особенностью ДфР в сравнении с другими разрядами в воде, в газах и твердых телах, поскольку в этих случаях практически всегда образуется только один канал разряда.

Развитие разряда

После пробоя отверстия диафрагмы сопротивление R_o будет составлять уровень единиц Ω и сопротивление всего междуэлектродного промежутка R_{IE} станет определяться сопротивлением отверстия на воду $R(r)$. Особенностью этого сопротивления является его увеличение (от нуля) с удалением от отверстия. Уже при $r = l_A = 10 \text{ mm}$ электрод оказывается отделенным от отверстия практически максимальной величиной сопротивления воды $R(l_A) \sim 113 \text{ k}\Omega$ (2). Из-за этого от пробитого отверстия разряд развивается в сторону электрода с растеканием тока через всю среду полупространства. Это стимулирует, в частности, развитие анодных стримеров перед „полупробоем“ в разные стороны полупространства, а не только прямо на анод (рис. 1, *a*). Далее ток со всей среды замыкается на электрод с переходным сопротивлением среда–электрод, начальное значение которого составляло $R_e \sim 2 \text{ k}\Omega$ (3). Развитие разряда (т.е. факелов) уменьшает значение $R(r)$ до уровня R_e . Такая картина развития ДфР подтверждается осциллограммами, из которых видно, что при максимуме тока $R(t) \sim R_{IE}$ составляет $\sim 2 \text{ k}\Omega$ (рис. 2). Эта величина согласуется с расчетным сопротивлением электродов

($2R_e \sim 4 \text{ k}\Omega$), особенно если учесть нагрев воды перед пробоем, снижающий ее сопротивление, и погрешности осциллографирования. При „полупробоях“, как и следовало ожидать, предпробивная величина R_{IE} прыжком b падает приблизительно вдвое (рис. 3, кривая 3).

Заключение

ДфР имеет существенные отличия от других видов разрядов. Они состоят в разнесенности во времени импульсов напряжения и тока (импульс тока на хвосте импульса напряжения), в наличии такого явления, как „полупробой“ с соответствующим изменением процесса развития всего разряда (со сменой длительности его во времени, сменой формы и амплитуд импульсов тока), в особенностях факельных проявлений ДфР, в особенностях влияния электропроводимости среды σ на указанные процессы и факельные образования. Существенно отличительными в феноменологии ДфР являются особый вид катодного „полупробоя“ и возможность одновременного развития множества параллельных ДфР по периметру отверстия диафрагмы. Из работы следует также, что для поджига ДфР не требуется предварительное заполнение парами жидкости отверстия диафрагмы.

Список литературы

- [1] Šunka P., Babický V., Člupek M., Lukeš P., Šimek M., Schmidt J., Černák M. Plasma Sources Sci. Technol. 1999. Vol. 8. P. 258–265.
- [2] Дробышевский Э.М., Жуков Б.Г., Резников Б.И., Розов С.И. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 2. С. 255–262.
- [3] Фальковський М.І., Божко І.В. // Технічна електродинаміка. 2006. № 5. С. 17–24.
- [4] Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск: Изд-во ТГУ, 1975. С. 122–129.