

04;12
©1995

МНОГООЧАГОВЫЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ РАЗРЯД В ЖИДКОСТИ

В.С.Тесленко, А.И.Жуков, В.В.Митрофанов

В работе рассматривается электрический разряд в жидкости с образованием множественных плазменных очагов, расположенных над поверхностью одного из электродов, внешней по отношению к межэлектродному пространству и открытой для излучения ударно-акустических волн. Форма этой поверхности может задаваться.

Разряд в жидкости представляет собой сложное явление, включающее совокупность различных физических процессов, носящих статистический характер и зависящих от большого числа факторов: проводимости, полярности, состояния электродов, свойств жидкости и т. д., что объясняет наличие в литературе противоречивых интерпретаций результатов экспериментов и многообразии физических моделей явления [1-7]. Экспериментально установлено, что увеличение электропроводности жидкости приводит к подавлению режима искрового пробоя между электродами в системах плоскость-острие: плазменное образование наблюдается только вблизи острия, не прорастая до противоположного электрода ("беспробойный" разряд). При значительном увеличении проводимости искра и корона вообще не возникают [1,5]. Этим объясняется уменьшение интенсивности свечения и амплитуды УВ при увеличении концентрации электролита в растворе.

Возможность осуществления одновременного беспробойного разряда на многих обострителях рассмотрена в работе [5] в условиях, когда плазменные очаги образуются внутри пространства между электродами. Такие системы и устройства можно называть закрытыми. Они не выгодны с точки зрения вывода ударно-акустических волн (УВ) во внешнюю среду, так как часть излучаемой энергии отражается и рассеивается при прохождении УВ через противоположный электрод-пластину или сетку. Кроме того, при таком расположении электродов затруднительно визуальное наблюдение разрядов.

В наших экспериментах была разработана специальная схема расположения электродов, которая позволила избежать отмеченных недостатков.

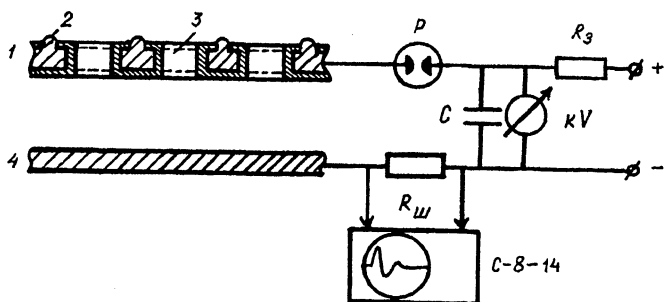
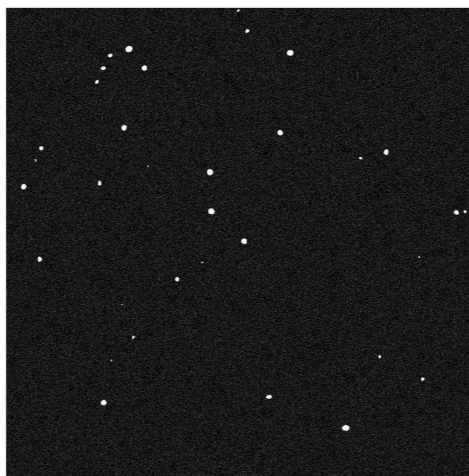


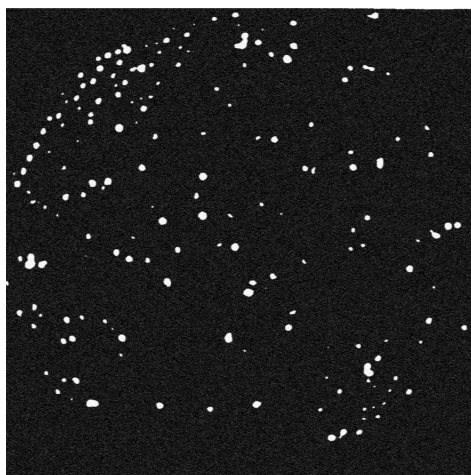
Рис. 1. Принципиальная схема экспериментов: 1 — многоострый электрод в диэлектрической матрице D , 2 — элемент-обостритель в матрице, 3 — отверстия в матрице, 4 — отрицательный электрод.

Принципиальная схема постановки экспериментов представлена на рис. 1. Положительный излучающий электрод 1 с обострителями 2 был выполнен по специальной технологии в виде решетчатой периодической структуры в диэлектрическом каркасе (D) с отверстиями $d = 1$ мм 3. Вся поверхность электрода, за исключением обострителей, покрыта диэлектриком. Обострители электрического поля имели в среднем размеры $S \approx 0.3 \times 0.5$ мм, $h \approx 0.1$ мм. Расстояние между обострителями $l \approx 3$ мм. Количество излучающих центров-обострителей около 2000 шт. Отрицательный электрод 4 располагался снизу от пластины положительного электрода. Расстояние между электродами H фиксировалось для каждой сборки устройства в интервале 2–50 мм. Электродная система погружалась в раствор электролита. Конденсатор емкостью $C = 2$ мкФ разряжался на рабочие электроды 1, 4 с помощью управляемого разрядника P . Ток разряда контролировался с помощью малоиндуктивного шунта Паркера $R = 10^{-3}$ Ом и осциллографа С-8-14. Опыты ставились в диапазоне напряжений 1–10 кВ в водном растворе поваренной соли с концентрацией 5–20%.

При такой постановке опытов в зависимости от соотношения площадей обострителей и отверстий разряд может происходить либо на самих обострителях, либо в отверстиях. Разряд на отверстиях называют “диффузионным” или “диафрагменным” разрядом [2,5]. Для исключения возможности развития диафрагменного разряда соотношение площадей электродов и отверстий выбиралось таким образом, чтобы разряд происходил только на обострителях. Суммарная площадь обострителей S_+ была существенно меньше суммарной площади отверстий S_0 и площади противоположного электрода S_- ($S_+ \approx 1/5 S_0$, $S_+ \approx 1/80 S_-$).



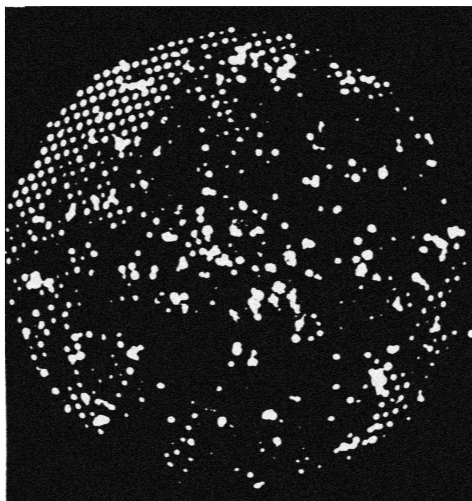
5 кВ



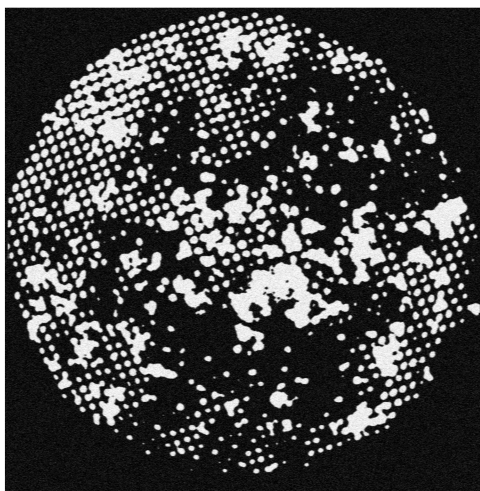
6 кВ

Рис. 2. Фотографии многоочагового электрического разряда в 10%-м растворе поваренной соли при напряжениях: 5, 6, 7, 8 кВ соответственно.

В 10%-м растворе NaCl при напряжении 4-5 кВ наблюдалось бледно-желтое свечение отдельных очагов. С увеличением напряжения включались новые очаги и видимый цвет разряда менялся на бело-голубой. На рис. 2 приведены фотографии, сделанные при открытом затворе фотоаппарата в темноте, для $H = 4$ мм ($\pm 25\%$ по всей площади) при напряжениях 5, 6, 7, 8 кВ соответственно. При напря-



7 кВ



8 кВ

Рис. 2 (продолжение).

жениях больше 8 кВ происходило слияние очагов свечения в единые обширные области, что объясняется инициированием также диффузионного разряда вначале на отверстиях с заусенцами и микропузырьками газа, затем и на других отверстиях. Ниже рассматривается только разряд при напряжениях до 8 кВ, когда свечение в отверстиях не наблюдается. Уменьшение концентрации электролита приводит к увеличению порогового напряжения, при котором появля-

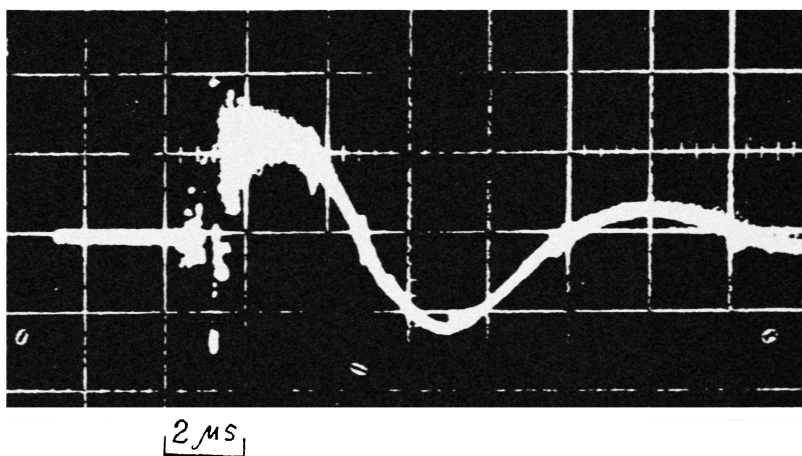


Рис. 3. Типичная осциллограмма тока для многоочагового электрического разряда в электролите.

ется видимое свечение очагов разряда. Период колебаний тока слабо зависит от проводимости электролита, но меняется при изменении сборки электрической схемы. В зоне роста и в максимуме значений тока имеется особенность: для всех испытанныхборок наблюдались высокочастотные токовые выбросы с частотой порядка 10 МГц. На рис. 3 приведена одна из типичных осциллограмм тока для многоочагового разряда в варианте сборки токового контура с расстоянием между электродами $H = 40$ мм. Амплитудные значения тока имеют статистический разброс для фиксированныхборок в разных опытах. Так, для сборки с расстоянием между электродами $H = 4$ мм, для короткой токовой линии измерения максимальных значений тока укладываются в область от 10 до 20 кА при напряжении 4 кВ и от 25 до 35 кА при 8 кВ. Период колебаний тока был при этом в пределах $T = 2.6-2$ мкс.

Наличие высокочастотных составляющих на осциллограммах тока позволяет объяснить механизм многоочагового разряда в электролите. Так, в работе [6] для одиночного электрода-обострителя установлено, что после образования парогазовой пленки наступает пауза тока с последующим плазменным разрядом между электролитом и электродом. В нашем случае эти явления, по-видимому, происходят параллельно и последовательно во времени на многих очагах разряда.

Можно предложить следующую модель механизма многоочагового разряда с учетом реально существующего разброса размеров электродов-обострителей. Для упрощения качественного описания аналогично [5] будем считать

электроды-обострители полусферами с различными радиусами, распределенными дискретно в некотором интервале размеров. При подаче напряжения U напряженность поля у поверхности каждого обострителя с радиусом r_n будет равна U/r_n , плотность тока — $U\sigma/r_n$ (σ — проводимость жидкости), а удельная объемная мощность тепловыделения $P_n = U^2\sigma/r_n^2$. При достижении определенного перегрева происходит взрывообразное вскипание жидкости над поверхностью электрода с образованием парок капельной прослойки и разрывом контакта электролит-металл. Одновременно в жидкость излучается волна сжатия, а в печи обостритель-электролит наступает пауза тока. Последующий рост напряжения вызывает искровой пробой (обостритель-электролит) через парок капельную прослойку. Интенсивное расширение жидкости-пара в зонах пробоя порождает дополнительное излучение волн давления.

Первоначально эти процессы протекают около обострителей с минимальными радиусами r_1 , поскольку удельное тепловыделение здесь максимально. Далее с разбросом по времени аналогичные последовательности процессов происходят вокруг других обострителей с радиусами $r_n > r_1$. Паузы местного тока и электропробой парок капельных прослоек (пузырьков) генерируют высокочастотные составляющие на осциллограмме общего тока. Из-за неоднородного по углу распределения токов в каждой прослойке возникают дополнительные пульсации поля скоростей и давлений. Волны давления, идущие из зоны каждого обострителя, влияют при этом на последующие процессы вокруг соседних обострителей. УВ может разрушать паровую прослойку, восстанавливается прямой контакт между металлом и электролитом, и весь процесс может повторяться. В работе [6] для одного электрода-обострителя паузы тока и высокочастотные пульсации наблюдались в первой четверти периода тока. В наших экспериментах высокочастотные пульсации тока регистрировались и на последующих полупериодах тока, при напряжениях более 8 кВ. Это связано, очевидно, с широким распределением обострителей по размерам.

Лабораторная технология изготовления излучающего электрода не позволила сделать все обострители достаточно одинаковыми, тем не менее наблюдается однородность свечения на отдельных участках (см. рис. 2). В данном случае разнокалиберных обострителей режимы пауз тока, видимо, имеют определяющее значение в обеспечении саморегулируемого зажигания плазменного разряда на всей открытой поверхности излучающего электрода.

С описанным многоочаговым разрядом были проведены эксперименты по генерации ударных волн с фокусировкой. Аналогичная рис. 1 схема была реализована для сфериче-

ской геометрии излучающего электрода с радиусом кривизны 170 мм и апертурой 145 мм. Параметры ударных волн регистрировались пьезоэлектрическими датчиками давления с пространственным разрешением 0.5 мм и временным разрешением 0.05 мкс. Так, для 5% электролита при напряжении на конденсаторе 8 кВ в фокусе регистрировались импульсы давления $P = 20-30$ МПа, с длительностью по полувысоте импульса $\theta = 1-1.5$ мкс.

Таким образом, установлена возможность осуществления устойчиво повторяемого многоочагового разряда в электролите на системе искусственных обострителей в открытом для излучения ударных и акустических волн пространстве. В рассмотренной постановке многоочаговый электрический разряд может быть положен в основу нового класса световых источников и генераторов ударно-акустических волн, которые могут найти применение в научных исследованиях, в подводной акустике и в медицине.

Авторы приносят свою благодарность Ю.В. Андриянову, В.А. Майеру за полезные обсуждения работы и А.Н. Кудряшову за помощь в изготовлении электродов.

Список литературы

- [1] Мельников Н.П., Остроумов Г.А., Стояк М.Ю. // ЖТФ. 1964. Т. 34. В. 4.
- [2] Резников Б.И., Жуков Б.Г., Сосновский А.В. // ЖТФ. 1977. Т. 47. В. 12.
- [3] Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М., 1971.
- [4] Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наук. Думка, 1986.
- [5] Теляшов Л.Л. Особенности развития беспробойного разряда в жидкости. Электронная обработка материалов. 1989. № 2.
- [6] Жуков М.Ф., Дандарон Н.Б., Замбалаев Ж.Ж., Федотов В.А. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1984. № 4. В. 1.
- [7] Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск, 1975.

Институт гидродинамики
им. М.А.Лаврентьева СО РАН
Новосибирск

Поступило в Редакцию
29 мая 1995 г.