

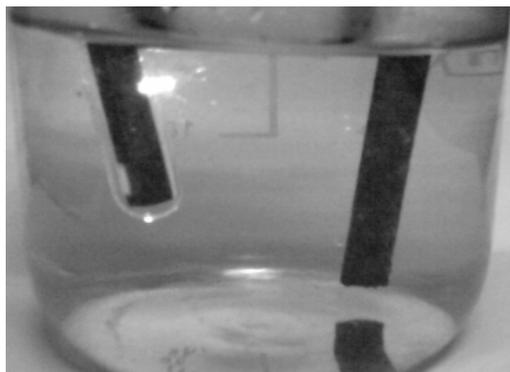
А.В. Хлюстова, А. М. Манахов, А. И. Максимов

ОДИН СЦЕНАРИЙ РАЗВИТИЯ НИЗКОВОЛЬТНОГО «ПОДВОДНОГО» РАЗРЯДА

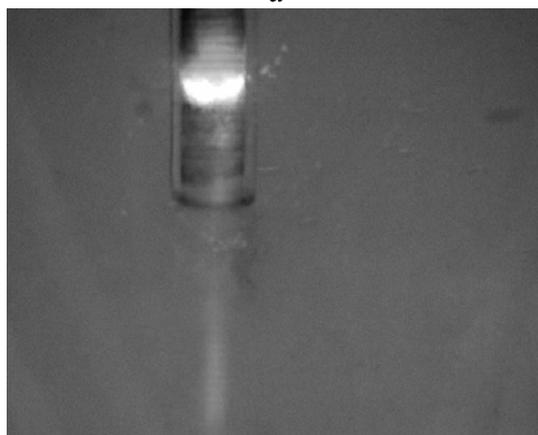
Институт химии растворов РАН,
ул. Академическая, 1, г. Иваново, 153045, Россия, kav@isc-ras.ru

Введение

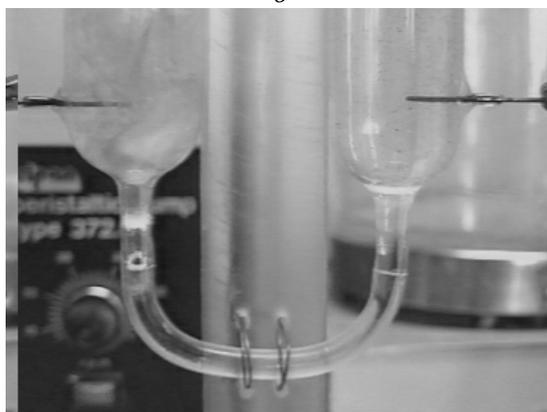
К низковольтным (не импульсным) «подводным» разрядам относятся диафрагменный, капиллярный, «торцевой» и разряды, возникающие в длинных (изогнутых) трубках, наполненных электролитом (рис. 1).



a



б



в

Рис. 1. Внешний вид подводных разрядов. *a* – диафрагменный; *б* – торцевой; *в* – разряд в длинной диэлектрической трубке, заполненной электролитом

Общим для всех этих разрядов является то, что они зажигаются от (не импульсных) источников напряжением от ~ 500 В до нескольких тысяч вольт. Во всех случаях зажиганию разряда предшествует образование в объёме электролита паровых или парогазовых пузырьков, причём, как показывают оценки, преимущественную роль при этом играет парообразование в результате локального перегрева раствора. Опыт показывает, что конкретный механизм роста пузырьков и электрического пробоя зависит от геометрии системы, и в первую очередь от диаметра перекрываемого сечения трубки или диафрагмы. По-видимому, более прост механизм в случае разряда в диафрагме или сужающемся конце капилляра. Принято считать, что в этом случае образование пузыря приводит к перекрыванию проводящего канала и прекращению тока электролиза. В результате на возникший пузырек падает вся эдс источника (плюс эдс самоиндукции в случае питания переменным током). Если эта разность потенциалов достаточно велика, происходит электрический пробой. Данные работы [1] позволяют конкретизировать предполагаемый сценарий формирования подводного разряда для случая тонкого капилляра. Действительно, формирование пузырька в виде растущего со стороны стенок кольца, являющееся следствием локального перегрева раствора, приведёт к постепенному сужению проводящего канала раствора на оси капилляра и росту падения напряжения на этом участке. Как и в предыдущем случае, при достаточно высоком падении напряжения произойдет электрический пробой пузыря. Однако для этого совсем не обязательно полное перекрытие капилляра перед пробоем. Несложно убедиться в том, что условия пробоя в данном случае будут зависеть от полного напряжения на ячейке и геометрии системы. Экспериментальные данные для капиллярных разрядов не противоречат описанной картине [2]. Однако исследования подводного разряда, формирующегося в широких трубках с электролитом, не укладываются в указанные рамки.

Условия экспериментов

«Торцевой» подводный разряд зажигался в стеклянной трубке с внутренним диаметром 10 мм, погруженной вертикально в раствор с электролитом. Графитовый электрод, перекрывающий сечение трубки, помещался на расстоянии 5–15 мм от среза трубки. Второй электрод размещался в объёме основной ячейки. В качестве электролитов использовались водные растворы серной кислоты и сульфата натрия с концентрацией 0,01М – 0,1М. Разряд зажигался от трансформатора на частоте 50 Гц с максимальным напряжением не более 2500 В и током до 1–2 А. Подробная схема эксперимента была описана ранее [3]. Переход к трубке достаточно большого диаметра привел к тому, что фазы развития разряда, включая рост пузыря и его пробой, существенно замедлились, что облегчило их наблюдение и анализ. При этом, меняя подаваемое на ячейку напряжение, можно было остановить развитие процесса на одной из фаз.

Сценарий формирования «торцевого» подводного разряда

Рост пузыря

При относительно малом напряжении на ячейке наблюдается рост парогазового пузыря без дальнейшего пробоя. Нагрев электролита при этом ещё недостаточен для быстрого роста парового пузыря, поэтому существенный вклад в этот процесс вносит электролиз. В зависимости от расстояния между электродом и срезом трубки пузырь может зафиксироваться непосредственно у среза или в промежуточном между электродом и срезом положении. Образование пузыря приводит к тому, что ток в цепи падает от 1–2 А до нескольких миллиампер. Между пузырем и стенкой трубки остаётся кольцевой зазор, заполненный электролитом.

Тихий разряд

При более высоком напряжении на ячейке возникают пробой в электролите, заполняющем кольцевой зазор между пузырьком и стенками трубки (рис. 2). Они представляют собой микроразряды, быстро перемещающиеся по окружности в этом кольцевом зазоре. Сила тока в цепи возрастает от нескольких миллиампер до ~20 мА.

Траектория движения микроразрядов заметно отличается от окружности и, кроме того, перемещается по вертикали. Эта форма разряда может устойчиво существовать достаточно продолжительное время, зависящее от напряжения на ячейке, химического состава раствора и его температуры. После этого наблюдается развитие разряда в самом пузыре, приводящее к схлопыванию пузыря с выбросом активной фазы в область основного раствора и возбуждением в растворе мощной звуковой волны. Наблюдаемая экспериментально длительность существования «тихой» формы разряда приведена в табл. 1.

Осциллограммы тока, напряжения и интенсивности интегрального излучения в процессе формирования «тихого» разряда приведены на рис. 3. Область *a* отвечает сформировавшемуся пузырю до пробоя. Высокое напряжение на ячейке при очень малом токе и излучении – на уровне фона.

При переходе к «тихому» разряду (область *b*) ток возрастает, напряжение на ячейке падает, появляется излучение небольшой интенсивности, синхронизованное с внешним напряжением.

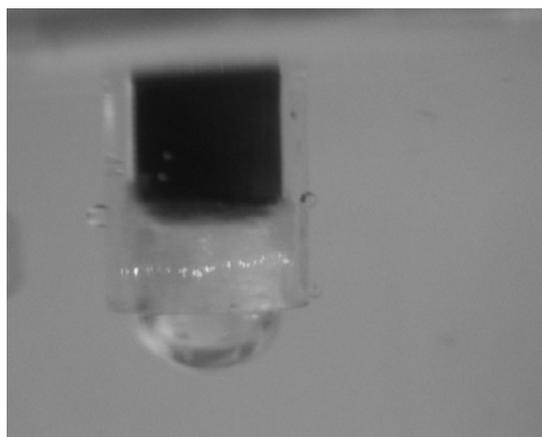


Рис. 2. Микроразряды в кольцевом зазоре между пузырьком и стенкой трубки («тихий» разряд)

Таблица 1. Длительность существования «тихой» формы разряда

Раствор	Концентрация, моль/л	Электропроводность, мСм/см	Время устойчивого горения
Na ₂ SO ₄	0,002	0,65	Более 1 ч
H ₂ SO ₄	0,06	5	Более 1 ч
Na ₂ SO ₄	0,02	5	~5 мин
H ₂ SO ₄	0,015	10	~10 мин
Na ₂ SO ₄	0,05	10	Менее 1 мин
Na ₂ SO ₄	0,1	15	~1 сек

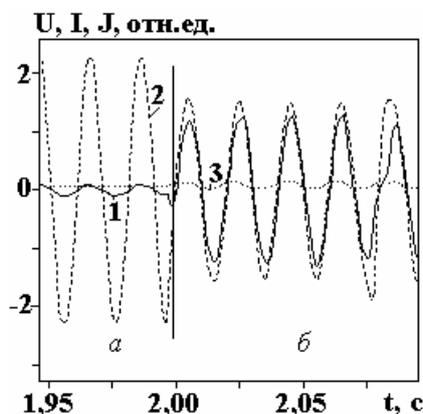


Рис.3. Ток в ячейке (1), напряжение (2) и интенсивность интегрального излучения (3). Na₂SO₄ 0,01 М

Активная форма разряда

Переход разряда в активную форму представляет собой распространение пробоя на весь объём пузыря с последующим его расширением, сопровождающимся выбросом в ячейку продуктов плазмолиза и активированного раствора (рис. 4). Процесс сопровождается возбуждением в растворе интенсивной звуковой волны с максимальной амплитудой на частоте около 2 кГц. Активная форма разряда характеризуется послесвечением длительностью до ~ 0,1–0,2 с.

Переход от «тихого» разряда к активной форме иллюстрируют осциллограммы рис. 5.

Повышение напряжения на ячейке приводит к тому, что активная форма разряда возникает, не задерживаясь на двух промежуточных фазах, – на образовании пузыря и зажигании «тихого» разряда. При этом наблюдаются повторные зажигания разряда (рис. 6), переходящие в пределе (при высоком напряжении и нагретом растворе) к горению, синхронизованному с внешним напряжением.

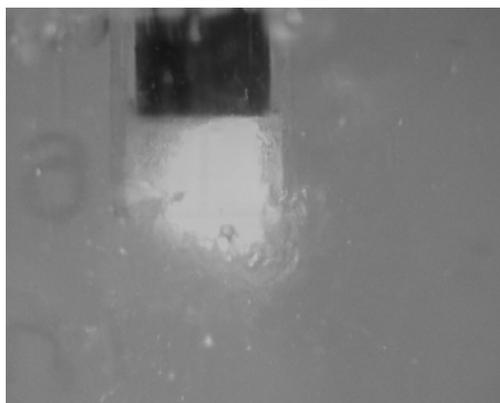


Рис.4. Активная форма подводного «торцевого» разряда

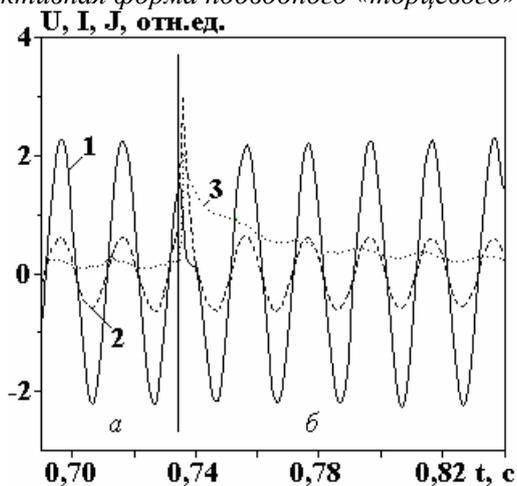


Рис. 5. Ток в ячейке (1), напряжение (2) и интенсивность интегрального излучения (3). Na_2SO_4 0,05 М

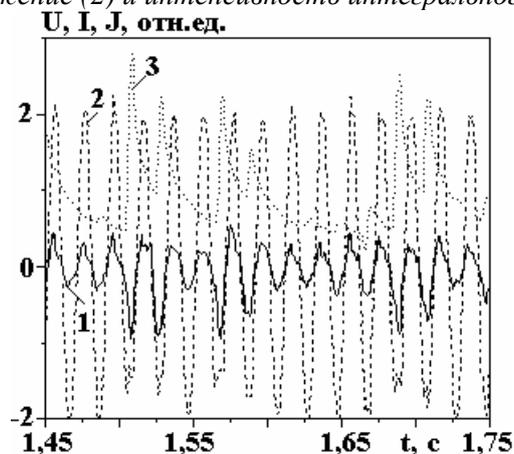


Рис. 6. Осциллограммы тока (1), напряжения (2) и интенсивности интегрального излучения (3), Na_2SO_4 0,04 М. Повторные зажигания активной формы разряда

Напряжение «прямого» зажигания активной формы разряда зависит от химического состава раствора, его электропроводности и температуры. Некоторые данные для растворов комнатной температуры приведены в табл. 2.

Таблица 2. Напряжение зажигания активной формы «торцевого» разряда при температуре раствора 25°C

Раствор	Электропроводность, мСм/см	Напряжение пробоя, В
Na_2SO_4 , 0,05М	9	400
Na_2SO_4 , 0,025М	5	450
Na_2SO_4 , 0,02М	0,65	1000
H_2SO_4 , 0,015М	9	950

Выводы

Один из возможных сценариев развития низковольтного «подводного» разряда в диэлектрических трубках, заполненных раствором электролита, включает три основные фазы: 1) образование парогазового или парового пузыря, не полностью перекрывающего сечение трубки; 2) зажигание «тихого» разряда в прослойке электролита между пузырем и стенкой трубки; 3) переход «тихого» разряда в активную форму, заполняющую весь пузырь, с последующим схлопыванием плазменного пузыря. При относительно низких напряжениях на ячейке все фазы можно реализовать отдельно во времени. При высоком напряжении первые две фазы занимают очень короткое время и могут не наблюдаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Санкин Г.Н. Автоциклический кольцевой пробой в электролите с вынужденным коллапсом пузырьков // Письма в ЖТФ. 2006. Том 32. Вып. 4. С. 24–31.
2. Nikiforov A. Yu., Leys C. Influence of capillary geometry and applied voltage on effectiveness of hydrogen peroxide and OH radicals formation in AC underwater electrical discharge // Plasma Sources Science and Technology. 2006. V.15. N.4. P. 818–828.
3. Хлюстова А.В., Манахов А.М., Максимов А.И., Хорев М.С. Связь электрических и оптических свойств плазменно-растворных систем // Электронная обработка материалов (в печати).

Поступила 26.05.09

Summary

The scenario develop of the underwater discharge on the base of experimental data of current, voltage and spectral line intensity oscillogramms analysis was suggested. There are three basic stage of discharge formation: bubble growth, quiet discharge and active form of discharge that different from previous forms by sharp pulse of intensity and large amplitude of voltage.
