

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ-ПРОБОЙ В ТОНКИХ СЛОЯХ ЭЛЕКТРОЛИТА

В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Медведев Р.Н.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Россия, 630090 Новосибирск, просп. ак. Лаврентьева, 15

e-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Впервые проведены экспериментальные исследования динамика электрического взрыва и пробоев для тонких электролитных проводников при напряжениях 0,8-1,6 кВ. Обнаружены пульсирующие искровые сполохи-пробои в пузырьках. При взрыве тонких слоев электролита в разрывах развиваются пробои с переходом в квази-стационарный дуговой режим. Обнаружены процессы самовыравнивания промежутка во фронте пробоя между жидкими электродами и перемещение дугового фронта в область катода.

В работах [1,2] были осуществлены автоколебательные режимы генерации тока и пузырьков на линейных и кольцевых концентраторах тока с регистрацией вспышек света при минимальных значениях тока в периоды роста и захлопывания пузырьков. Механизм наблюдаемых вспышек отождествлялся с механизмом разрядов на границах пузырьков между жидкими электродами. Для проверки данной гипотезы были поставлены модельные эксперименты по формированию разрядов при взрывном вскипании тонкого слоя электролита в ограниченном плоском и коническом объеме и на межфазной границе жидкость-газ.

В экспериментах использовался конденсаторный накопитель с емкостью 8 мкФ. Собственная индуктивность установки 3 мкН. Эксперименты проводились при напряжениях на конденсаторе $U = 300-1600$ В. В качестве электролита использовались водные растворы хлористого натрия, хлорного железа или карбоната калия с концентрацией 1-5 %. Во всех экспериментах совместно с теневой киносъемкой осуществлялась синхронная регистрация тока и напряжения.

На Рис. 1 представлены отдельные кадры киносъемки и соответствующие осциллограммы тока и напряжения для случая развития электрогидродинамических процессов в ограниченном канале ($l=7$ мм) в виде тонкой щели. Щель представляла собой клиновидный слой электролита, помещенный между двумя пластинами, с увеличением толщины вправо до $h \approx 100$ мкм. Металлические электроды из нержавеющей стали находились за пределами поля съемки. Расстояние между металлическими электродами было 14 мм.

Из экспериментальных данных следует, что первые пузырьки (1) рождаются на острие жидкостного клина (в области минимальной ширины щели) и расширяются к основанию клина (3). Начальный участок осциллограммы примерно до 2 мс соответствует протеканию тока по сечению электролитного канала и характеризует время и выделяемую мощность в жидкости. Падение тока соответствует образованию и росту пузырька. С увеличением размера пузырька ток падает, и становится минимальным при касании пузырьком границы основания клина (3). Этот момент соответствует возникновению сполохов свечения внутри пузырька и падению тока, протекавшему по электролиту. При этом могут возникать стохастические паузы увеличения тока, что соответствует открытию локальных сечений электролита в конусе, а периоды уменьшения тока соответствуют перекрытиям сечения электролита пузырьками. Это связано с неустойчивостями границы образованных пузырьков. В эти периоды наблюдаются сполохи внутри пузырьков. Ток, при этом, падает до величин 0,2-0,3 А. Сполохи могут иметь различное угловое направление, с развитием от «плюса» к «минусу» и наоборот. Это связано с динамикой неустойчивости межфазных границ пузырьков выражающихся в виде образования кумулятивных паровых струй, как

обострителей напряженности поля, и в виде гребней и перетяжек из электролита на границе диафрагмы между стенкой и паровым пузырем.

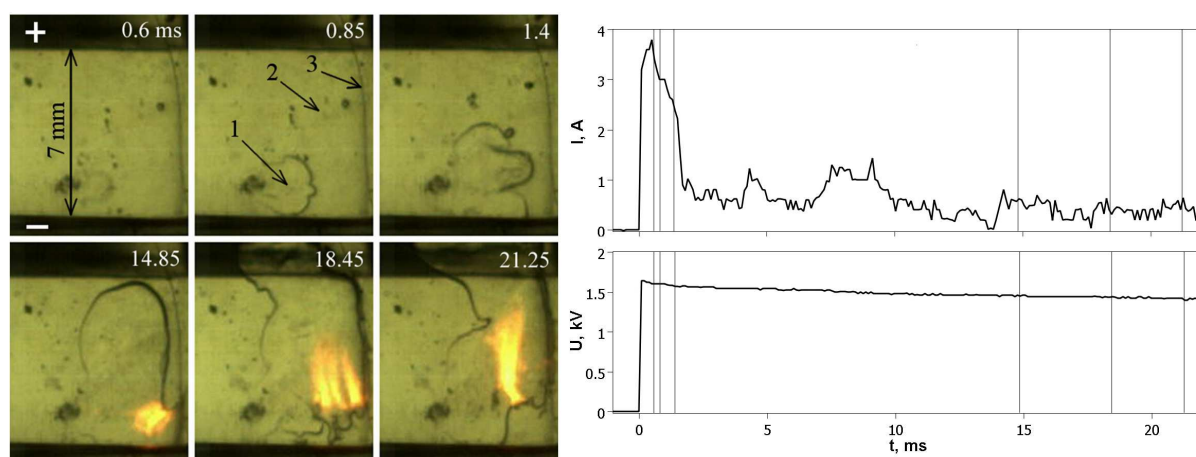


Рис. 1. Отдельные кадры динамики развития электрогидродинамических процессов и сполохов в клиновидной щели с 1% раствором NaCl: 1 – пузырёк пара, 2 – электролит, 3 – граница основания жидкого клина, светлые области – сполохи.

С целью выявления механизма пробоя и пространственной кинетики пробоя внутри пузырьков при диафрагменных разрядах выполнялись модельные эксперименты с плоскими слоями электролита, граничащими с воздухом. Диафрагменный разряд-пробой инициировался в области соединения двух секторов из электролита (Рис. 2). Граничными стенками представленной кюветы из секторов с электролитом (1) являлись два стеклышка (2) с толщиной h . С помощью варьирования h задавалась толщина слоя электролита. Для обеспечения диафрагменного разряда между секторами с электролитом делался необходимый зазор в области соединения секторов в виде «перемычки» с шириной d . Металлические электроды из нержавеющей стали в виде отрезков колец (с радиусом 8 мм) находились симметрично относительно перемычки и соответствовали периметру секторов.

На Рис. 2 представлены осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки динамики пробоя для 1% раствора хлористого натрия с толщиной слоя $h \approx 100$ мкм ($\pm 20\%$), с шириной перемычки $d = 0,35$ мм (вид сверху).

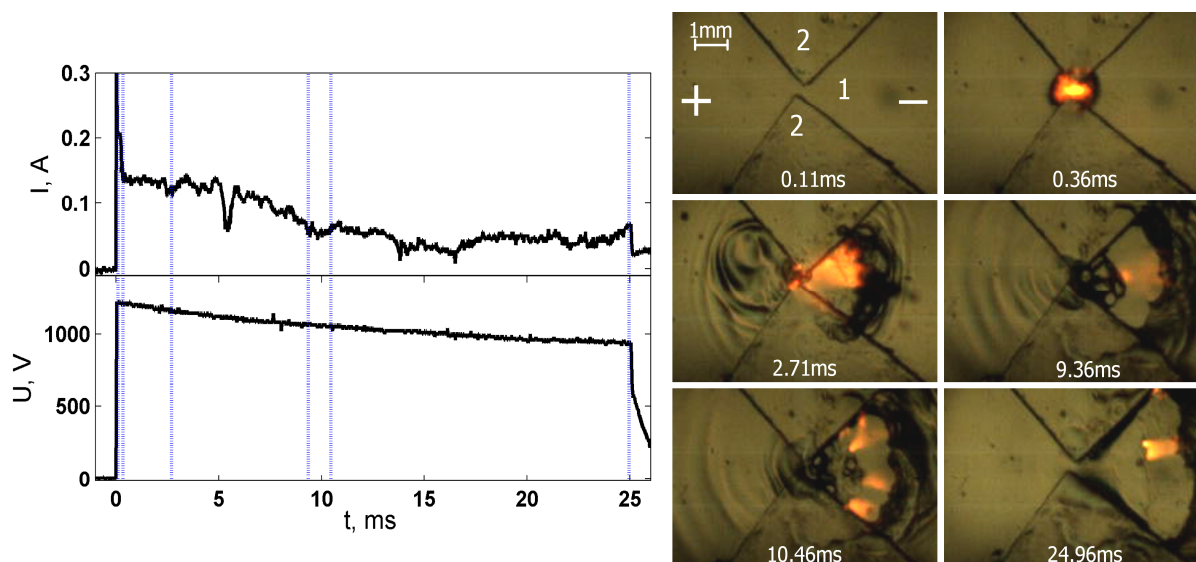


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки динамики пробоя при электрическом взрыве перемычки между секторами плоского слоя 1% NaCl электролита (вид сверху).

На Рис. 3 представлены осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки развития электрического взрыва перемычки с пробоем для 1% электролита хлористого натрия с толщиной слоя $h \approx 100$ мкм ($\pm 20\%$), с шириной перемычки $d = 0,35$ мм, съемка выполнена сбоку. Отметим, что амплитуда тока на Рис. 2, 3 зависит от начальных напряжений и толщины слоя электролита. Из данных кинограмм и осциллограмм следует, что падение тока совпадает с разрывом электролитной перемычки. Разрыв электролитной перемычки происходит за счет нагрева электролита электрическим током и последующего испарения, причем испарение происходит не с поверхности, а за счет образования пузырька на некоторой глубине и его последующего роста.

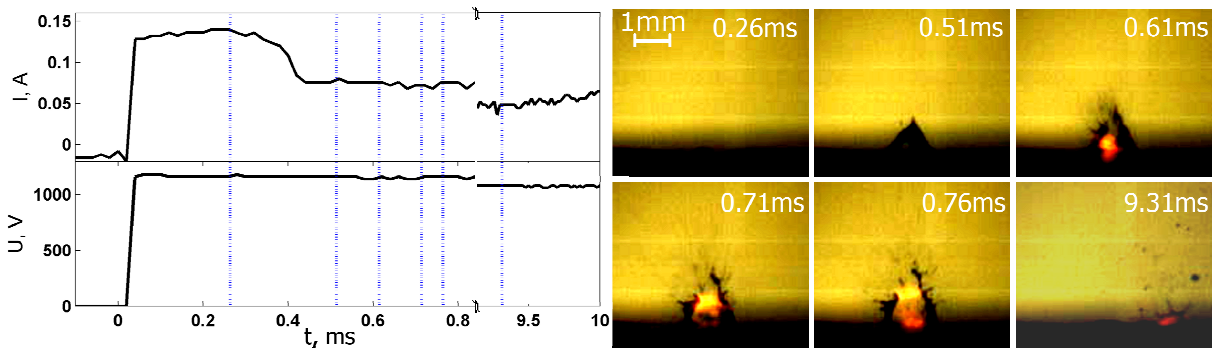


Рис. 3 Осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки динамики пробоя при электрическом взрыве перемычки между секторами плоского слоя 1% NaCl электролита (вид сбоку).

Результаты съемок двух проекций взрыва-пробоя показали, что после того как перемычка разорвалась образованным паровым пузырьком происходит падение так до 0,14 А (для Рис. 2), и до 0,07 А (для Рис. 3) с дальнейшим падением тока до 0,02-0,05 А, сопровождаемое пульсациями, которые коррелируют с яркостью и количеством стримеров в промежутке между жидкими электродами.

В целом из анализа экспериментальных результатов следует, что пробой развивается после того, как электролитная перемычка разорвалась паровым пузырьком. В этот момент напряженность поля $E=U/\delta$ между возникшими жидкими электродами экстремально велика и превышает среднее значение на более поздних стадиях. При разрыве электролита происходит падение тока и возникает скачек локальной напряженности электрического поля между образованными жидкими электродами, это обеспечивает начальный пробой газа в паровой фазе. При этом пробоеи наблюдаются и выше высоты кюветы h между брызгами электролита (Рис. 2). После этого возникший процесс пробоя переходит в квази-стационарный режим «горения» плазмообразующего разряда между жидкими электродами уже в секторе катода, с признаками дугового разряда. Возникающий промежуток δ между жидкими электродами выходит на квази-стационарные значения по параметру напряженности электрического поля E , т. е. при уменьшении напряжения ширина промежутка (зазора) уменьшается пропорционально. С переходом пробоя на квази-стационарный режим пробоя наблюдается перемещение границ жидкого катода и анода в сектор катода (Рис. 1). При этом наблюдается эффект поддержания размера промежутка между жидкими электродами. Это происходит за счет того, что пробоеи возникают в самых «узких» местах промежутка (на гребнях), где

расстояние между жидкими электродами минимально, испаряя их и выравнивая ширину зазора. Так устраняются возникающие неустойчивости обеих границ на двух жидких электродах в виде дуговых сегментов. Пробои как бы сканируют по возникающим гребням на границах дуговых сегментов из жидких электродов. При этом расстояние между жидкими электродами δ на всей длине зазора поддерживается приблизительно на одинаковом уровне. В данном случае возникающий зазор можно считать, самоустанавливающимся, в соответствии с текущим параметром напряжения. Так для $U=1-1,2$ kV зазор между жидкими электродами находился в пределах $\delta = 1-1,3$ mm, соответственно. В среднем, напряженность поля, при котором поддерживался дуговой разряд, составляла $E \approx 1$ kV/mm. Характерно, что после выхода дугового разряда на квази-стационарный режим поверхностные волны наблюдаются преимущественно от границы фронта «горения» (испарения) катода. Для представленной кинограммы, скорость фронта зазора $V \approx 5$ m/s. Наблюдаемые поверхностные волны на жидком катоде более интенсивны, что является дополнительным свидетельством о более интенсивном испарении границы катода. Особо отметим, что для экспериментов с 1% водным раствором хлорного железа качественная картина сохраняется, и фронт испарения с пробоями перемещается так же в область катода. С очевидностью следует, что скорость нагрева на границах жидких анода и катода различна, т.е. на катоде выделяется энергии больше чем на аноде, за счет этого и обеспечивается перемещение фронта пробоя с поддерживаемым зазором в области катода.

Из данных экспериментов наглядно следует, что электрический взрыв-пробой тонкого слоя электролита развивается аналогично электрическому взрыву металлических проволочек и фольг [3,4]. Однако следует отметить, что получение полного подобия в постановке экспериментов чрезвычайно затруднено из-за сложности получения удовлетворительной повторяемости в экспериментах для цилиндрических электролитных проводников. Нестабильность в экспериментах обусловлена сложностью получения достаточной однородности сечения жидкого проводника. Именно эта особенность обусловила постановку экспериментов с электролитными секторами (Рис.2). Данная постановка обеспечивает удовлетворительную повторяемость в экспериментах за счет заранее задаваемого концентрации тока и позволяет избежать затрат энергии на плавление металла.

Выводы

Экспериментально показано, что в результате электрического взрыва тонкого слоя электролита в разрывах электролита развиваются пробои. Показано, что пробои переходят в квази-стационарный дуговой режим между образованными жидкими электродами.

Обнаружены процессы самовыравнивание промежутка и фронта пробоя между жидкими электродами и перемещение фронта дугового разряда в область катода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 10-08-00788.

Литература

1. В.С. Тесленко, Р.Н. Медведев Электродинамические автоколебания в электролите на линейных и кольцевых концентраторах тока. // ПЖТФ, 2011, т. 37, в. 10, стр. 56-63, <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2011/10/p56-63.pdf>
2. В.С. Тесленко, Р.Н. Медведев, А.В. Зайковский. Автоколебательные явления в электролите на кольцевых концентраторах тока. // Динамика сплошной среды, 2010, в. 126, с. 146-155, <http://www.swsl.newmail.ru/publ/DCM2010.pdf>
3. Г.В.Иваненков, С.А.Пикуз, Т.А.Шелковенко, В.М.Романова, И.В.Глазырин, О.Г.Котова, А.Н.Слесарева. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек. // Препринт ФИАН 2004г. в.№ 9, ч. 1, 26с., http://ellphi.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/2004_9.pdf
4. С.И. Ткаченко, А.П. Мингалеев, В.М. Романова, А.Е. Тер-Оганесян, Т.А. Шелковенко, С.А. Пикуз. Распределение вещества в токопроводящей плазме и плотном керне в

канале разряда при взрыве проволочек // Физика плазмы. -2009. –Т.35, № 9. – С.789-818.