

03

Электрический взрыв-пробой в тонких слоях электролита

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

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
E-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Поступило в Редакцию 17 апреля 2012 г.

Впервые проведены экспериментальные исследования динамики электрического взрыва и пробоев для тонких электролитных проводников при напряжениях 0.8–1.6 kV. Обнаружены пульсирующие искровые сполохи-пробой в пузырьках. При взрыве тонких слоев электролита в разрывах развиваются пробой с переходом в квазистационарный 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 μ F. Собственная индуктивность установки 3 μ H. Эксперименты проводились при напряжениях на конденсаторе $U = 800–1600$ V. 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 в виде тонкой щели длиной 7 mm. Щель представляла собой клиновидный слой

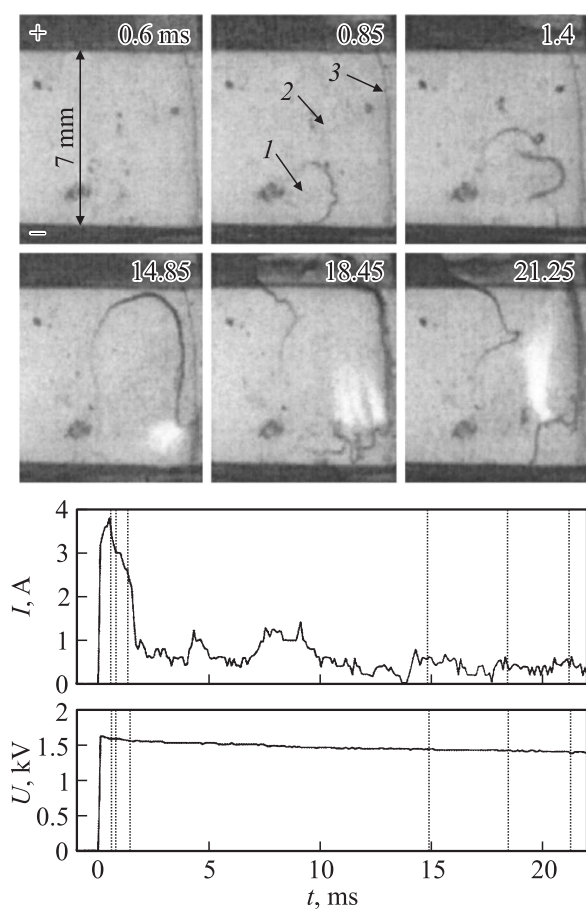


Рис. 1. Отдельные кадры динамики развития электрогидродинамических процессов и сполохов в клиновидной щели с 1%-м раствором NaCl: 1 — пузырек пара, 2 — электролит, 3 — граница основания жидкого клина, светлые области — сполохи.

электролита, помещенный между двумя пластинами, с увеличением толщины вправо до $h \approx 100 \mu\text{m}$. Металлические электроды из нержавеющей стали находились за пределами поля съемки. Расстояние между металлическими электродами было 14 mm.

Из экспериментальных данных следует, что первые пузырьки I рождаются на острие жидкостного клина (в области минимальной ширины щели) и расширяются к основанию клина 3 . Начальный участок осциллограммы примерно до 2 ms 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 $0.2\text{--}0.3\text{ A}$. 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.

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 I 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 mm) 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 $h \approx 100\text{ }\mu\text{m}$ ($\pm 20\%$), с шириной перемычки $d = 0.35\text{ mm}$ (вид сверху).

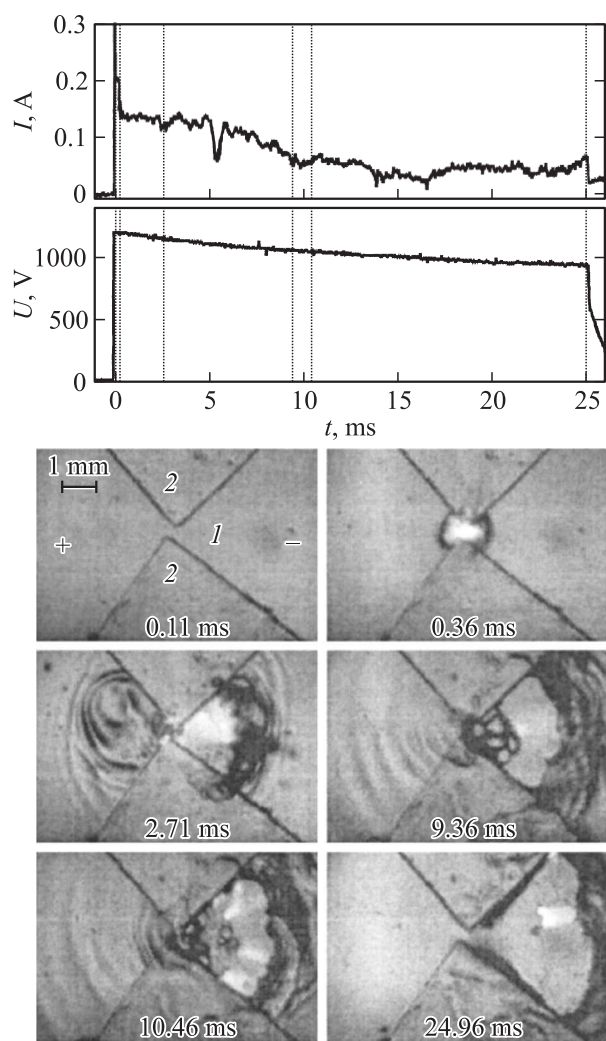


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки динамики пробоя при электрическом взрыве перемычки между секторами плоского слоя 1%-го электролита NaCl (вид сверху).

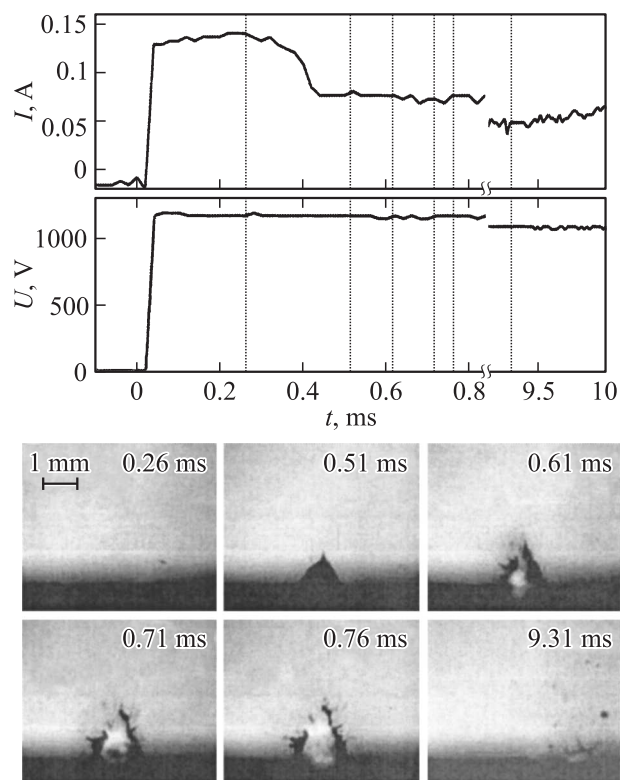


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки динамики пробоя при электрическом взрыве перемычки между секторами плоского слоя 1%-го электролита NaCl (вид сбоку).

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 $h \approx 100 \mu\text{m}$ ($\pm 20\%$), с шириной перемычки $d = 0.35 \text{ mm}$, 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 перемыч-

ки 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. Плотность тока в перемычке достигала 6 A/mm^2 . Удельная мощность в зазоре между электролитными секторами была в пределах 10^2 W/mm^3 , что на порядок меньше величины, необходимой для обеспечения режима взрывного вскипания жидкости [3].

Результаты съемок двух проекций взрыва-пробоя показали, что после того, как перемычка разорвалась образованным паровым пузырьком, происходит падение тока до 0.14 A (рис. 2) и до 0.07 A (рис. 3) с дальнейшим падением тока до $0.02\text{--}0.05 \text{ A}$. Падение тока сопровождается 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 скачок локальной напряженности электрического поля между образованными жидкими электродами, это обеспечивает начальный пробой газа в паровой фазе. При этом пробой наблюдаются и выше высоты кюветы h между брызгами электролита (рис. 2). После этого возникший процесс пробоя переходит в квазистационарный режим „горения“ плазмообразующего разряда между жидкими электродами уже в секторе катода, с признаками дугового разряда. Возникающий промежуток δ между жидкими электродами выходит на квазистационарные значения по параметру напряженности электрического поля E , т.е. ширина промежутка (зазора) уменьшается пропорционально напряжению. С переходом пробоя в квазистационарный режим наблюдается перемещение границ жидкого катода и анода в сектор катода (рис. 2). При этом наблюдается эффект поддержания размера промежутка между жидкими электродами. Это происходит за счет того, что пробой возникает 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. Пробой как бы сканирует 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 квазистационарный режим поверхностные волны наблюдаются преимущественно от границы фронта испарения катода. Для представленной кинограммы скорость перемещения фронта зазора с пробоями $V \approx 5$ m/s. Наблюдаемые поверхностные волны на жидком катоде более интенсивны, что является дополнительным свидетельством более интенсивного испарения границы катода. Особо отметим, что для экспериментов с 1%-м раствором хлорного железа качественная картина сохраняется, и фронт испарения с пробоями также перемещается 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.

Таким образом, экспериментально показано, что в результате электрического взрыва тонкого слоя электролита в разрывах электролита развиваются пробой. Показано, что пробой переходит в квазистационарный дуговой режим между образованными жидкими электродами.

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

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

Список литературы

- [1] Тесленко В.С., Медведев Р.Н. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 10. С. 56–63. <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2011/10/p56-63.pdf>
- [2] Тесленко В.С., Медведев Р.Н., Зайковский А.В. // Динамика сплошной среды. 2010. В. 126. С. 146–155. <http://www.swsl.newmail.ru/publ/DCM2010.pdf>
- [3] Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.