

## ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

## Стадии развития скользящего по поверхности воды электрического разряда

А. Ф. Александров, Д. Н. Ваулин, А. П. Ершов<sup>a</sup>, В. А. Черников*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: "ershov@ph-elec.phys.msu.ru"*

Выделены три стадии развития импульсного электрического разряда, возникающего вдоль свободной поверхности воды в атмосфере между острием, находящимся на некотором расстоянии от поверхности, и удаленным от него электродом, погруженным в воду.

PACS: 52.57 Kk.

*Ключевые слова:* скользящий разряд, квазипрямоугольный высоковольтный импульс, поверхность воды, стадии развития, скорость распространения.

Статья поступила 04.06.2008, подписана в печать 10.06.2008.

Разряды, возникающие вдоль границы раздела газ — твердое тело, газ — жидкость, образующие класс так называемых поверхностных разрядов, отличаются многообразием форм, физических механизмов распространения и поддержания разряда, а также разнообразием практических приложений [1–5]. Одним из примеров является разряд, возникающий в атмосфере между расположенным над поверхностью воды острием и электродом, погруженным в воду [3, 4]. В случае когда последний удален на заметное расстояние от острия, формируется скользящий разряд с лидерным механизмом развития [3]. В отличие от скользящего разряда по твердому диэлектрику, где ток лидера имеет емкостный характер [2], свойства такого разряда связаны с проводимостью воды. Однако использование в [3] емкостного накопителя в качестве источника питания разряда приводит к нестационарной картине разряда, усложняя физическую сторону явления.

В настоящей работе исследован скользящий вдоль поверхности воды разряд, создаваемый импульсным модулятором квазипрямоугольных высоковольтных импульсов. Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Техническая вода 2 наливалась в кювету 1, над которой на поворотном устройстве 6 располагался высоковольтный отрицательный электрод (катод) 5 в виде заостренного стержня. Плоский заземленный электрод (анод) 3 размещался на стойке 4 непосредственно в жидкости у противоположной стенки

кюветы. Источником питания служил импульсный модулятор 7, для ограничения разрядного тока использовалось балластное сопротивление 8. Падение напряжения на разряде определялось при помощи омического делителя напряжения ( $R_1$ ,  $R_2$ ), а разрядный ток — при помощи шунта 9, включенного последовательно в цепь разряда. Сигналы с делителя напряжения и шунта подавались на двухлучевой цифровой запоминающий осциллограф. Съемка разряда проводилась цифровым фотоаппаратом, анализ динамики развития разряда осуществлялся при помощи изменения длительности импульса.

В экспериментах варьировались начальные условия создания разряда: расстояние между электродами по горизонтали ( $L = 35–200$  мм), высота подъема катода над жидкостью ( $H = 1–10$  мм), балластное сопротивление  $R_b = 1–10$  кОм, начальное напряжение источника  $U_0 = 7–27$  кВ и длительность импульса разряда  $\tau = 10$  мкс — 1 мс.

Анализ полученных осциллограмм тока и напряжения разряда вместе с динамикой разрядного канала позволил выделить три различные стадии развития разряда. Проанализируем процесс развития разряда на примере его фотографии (а) и типичных осциллограмм тока и напряжения разряда (б), приведенных на рис. 2.

Первая стадия соответствует первичному искровому пробое воздуха между верхним электродом и водой. При этом с момента подачи напряжения на электроды  $t_0$  и до времени  $t_1$  разряд не происходит — этот интер-

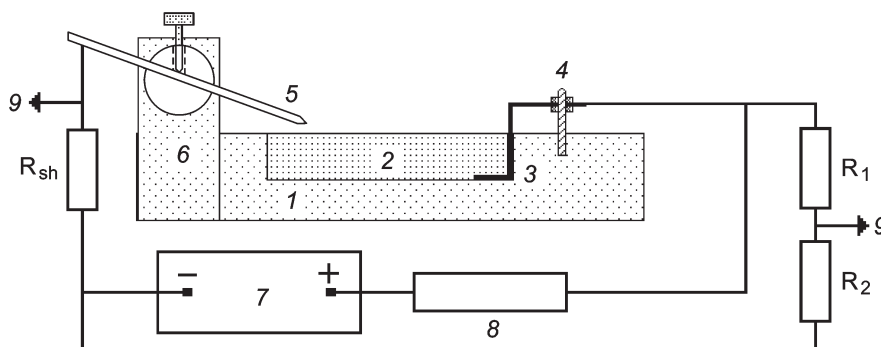


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — кювета, 2 — техническая вода, 3 — анод, 4 — стойка, 5 — катод, 6 — поворотное устройство, 7 — импульсный модулятор, 8 — балластное сопротивление, 9 — шунт

вал времени соответствует статическому запаздыванию пробоя разрядного промежутка. В момент времени  $t_1$  происходит пробой, который приводит к формированию линейного плазменного канала, перпендикулярного поверхности жидкости. Процесс возникновения искрового разряда в выбранном масштабе времени сопровождается практически мгновенным падением напряжения между электродами и появлением разрядного тока. При этом ток протекает по сформировавшемуся искровому каналу и водному промежутку, соответствующему расстоянию между электродами  $L$ . Поскольку проводимость воды невелика, полное сопротивление цепи, по которой протекает ток, достаточно велико. Даже для случая относительно короткого промежутка, которому соответствуют осциллограммы рис. 2, б, сопротивление разряда  $R_d \approx 1$  кОм, т.е. порядка  $R_b$ , и их суммарное сопротивление ограничивает величину разрядного тока в цепи.

Начиная с момента  $t_1$  в течение интервала времени  $t_2 - t_1$  наблюдается медленное нарастание разрядного тока и соответствующее уменьшение напряжения на разряде, т.е. реализуется вторая стадия. Фотографии разряда с длительностью импульса напряжения, лежащей в этом интервале времен, показывают, что от канала искрового разряда к аноду распространяется волна иониза-

ции — лидер, которая формирует плазменный канал над поверхностью воды. Разрядный ток замыкается через головку лидера на воду, создавая разряд, скользящий вдоль поверхности. Поскольку сопротивление части воды, по которой протекает разрядный ток, падает из-за сокращения длины, а сопротивление плазменного канала существенно меньше, суммарное сопротивление падает, приводя к росту разрядного тока и падению напряжения на разряде.

В момент времени  $t_2$  поверхностная волна ионизации достигает анода, и пространство между катодом и анодом замыкается воздушным плазменным каналом. Это приводит к резкому возрастанию тока и падению напряжения на разряде. Так, для случая, изображенного на рис. 2, сопротивление разрядного промежутка резко падает до значения порядка 200 Ом. С этого момента начинается третья стадия развития разряда над поверхностью воды. Для нее значения разрядного тока и напряжения на разряде остаются практически постоянными до конца импульса напряжения, поскольку ток в цепи ограничен балластным сопротивлением. Действительно, для амплитуды напряжения  $U_0 \approx 20$  кВ и  $R_b = 1$  кОм значение тока должно составлять  $I \approx 20$  А, что и показывает осциллограмма тока.

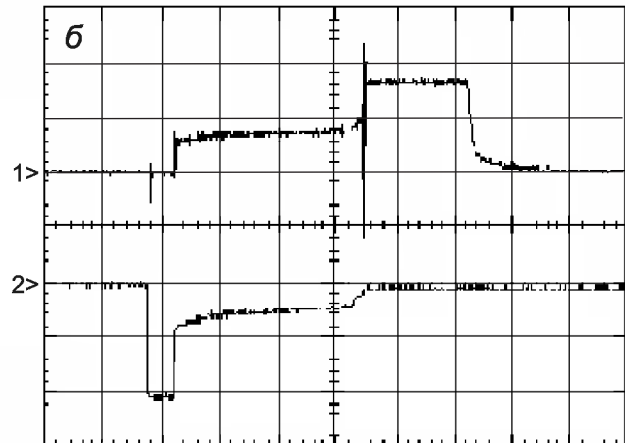
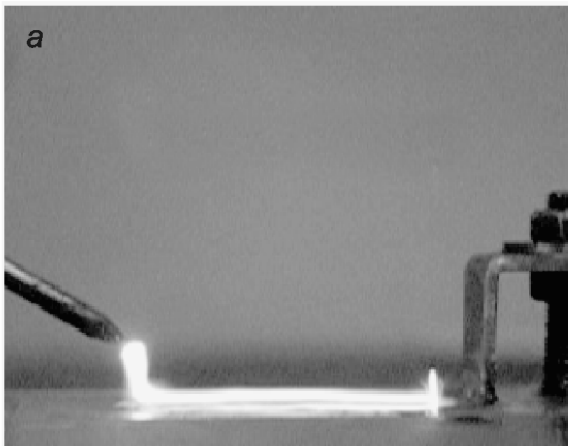


Рис. 2. Интегральная фотография (а) и соответствующие осциллограммы (б) тока 1 и напряжения 2 завершённого разряда.  $L = 50$  мм,  $H = 8.6$  мм,  $R_b = 1$  кОм,  $R_{sh} = 0.5$  Ом,  $U_0 = 22.2$  кВ,  $\tau = 300$  мкс. Развертка 50 мкс/дел, чувствительность по току и напряжению 5 В/дел

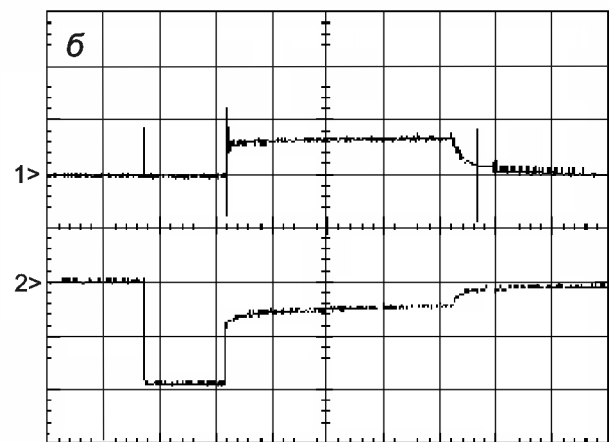
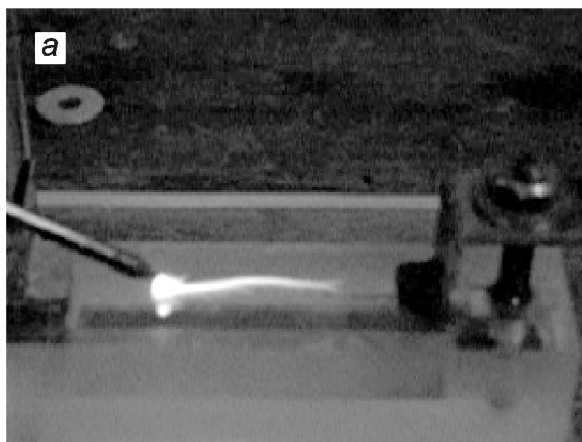


Рис. 3. Интегральная фотография (а) и соответствующие осциллограммы (б) тока 1 и напряжения 2 незавершённого разряда.  $L = 50$  мм,  $H = 5.4$  мм,  $R_b = 1$  кОм,  $R_{sh} = 0.5$  Ом,  $U_0 = 19.0$  кВ. Развертка 50 мкс/дел, чувствительность по току и напряжению 5 В/дел

В зависимости от начальных условий (амплитуда и длительность импульса, расстояние между электродами) разряд над поверхностью воды может быть как завершенным (рис. 2, *a*), так и незавершенным (рис. 3, *a*). Определяющим фактором при этом является элементарное соотношение между тремя параметрами разряда: расстоянием между электродами  $L$ , длительностью импульса напряжения  $\tau \equiv t_3 - t_0$  и скоростью распространения разряда над поверхностью воды на второй стадии  $v$ :  $L = v\tau$ . Если величина скорости относительно мала, так что за время длительности импульса волна ионизации не успевает «добежать» до анода, то разряд носит незавершенный характер (рис. 3, *a*). Если же скорость волны ионизации относительно велика, то разряд успевает за время длительности импульса (или за более короткое время) «добежать» до анода и получается завершенная форма разряда.

Анализ показывает, что величина скорости определяется напряженностью электрического поля в разрядном промежутке  $E$ , которая зависит от падения напряжения на участке воды между головной частью и анодом. Поэтому, изменяя сопротивление воды, начальное напряжение

импульса и балластное сопротивление, можно в широких пределах изменять скорость. Так, в экспериментах наблюдался диапазон скоростей от 300 м/с до 8 км/с. Очевидно, что чем больше при данном  $E$  длительность второй стадии, тем длиннее может быть стадия скользящего разряда и тем на большем расстоянии между электродами может быть обеспечен пробой.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта CRDF (RUP2-1514-MO-06).

### Список литературы

1. Евтюхин Н.В., Савельев А.В., Марголин А.Д., Шмелев В.М. // ДАН СССР. 1989. **307**, № 6. С. 1370.
2. Камруков А.С., Козлов Н.П., Протасов Ю.С. Радиационная плазмодинамика. Т. 1. М., 1991.
3. Белошеев В.П. // ЖТФ. 1998. **68**, № 7. С. 44.
4. Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Копьев В.А. и др. // Физика плазмы. 2006. **32**, № 11. С. 1048.
5. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 1. С. 77.

### Stages of sliding along water surface electric discharge

A. F. Aleksandrov, D. N. Vaulin, A. P. Ershov<sup>a</sup>, V. A. Chernikov<sup>b</sup>

Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>ershov@ph-elec.phys.msu.su, <sup>b</sup>vachernikov@rambler.ru.

Three stages of the pulse electric discharge, arising along a free surface of water in an atmosphere between an edge, taking place on some distance from a surface and removed from it electrode shipped in water, are revealed.

PACS: 52.57 Kk.

*Keywords:* surface discharge, rectangular high voltage impulse, water surface, stages of development.

Received 4 June 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2009)

### Сведения об авторах

1. Александров Александр Федорович — д. ф.-м. н., профессор, зав. кафедрой; тел.: 939-25-74.
2. Ваулин Д. Н. — аспирант; тел.: 939-38-85.
3. Ершов А. П. — д. ф.-м. н., профессор; тел.: 939-17-87, e-mail: ershov@ph-elec.phys.msu.su.
4. Черников В. А. — к. ф.-м. н., доцент; тел.: 939-38-85, e-mail: vachernikov@rambler.ru.