

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Определение скорости электрического разряда скользящего над поверхностью воды

Д. Н. Ваулин^а, А. А. Квас, В. А. Черников^б

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^аvaud@yandex.ru, ^бvachernikov@rambler.ru

Статья поступила 14.09.2009, подписана в печать 17.02.2010

Рассматриваются различные методы, основанные на определенных экспериментальных результатах, нахождения скорости распространения импульсного разряда над поверхностью воды.

Ключевые слова: скорость разряда, электрический разряд, скользящий разряд.

УДК: 533.9: 551.594. PACS: 52.57.Di.

Введение

Разряды, возникающие в воздухе при атмосферном давлении между расположенным над поверхностью воды острием и электродом, погруженным в воду [1–4], являются частным случаем широкого класса поверхностных разрядов, распространяющихся вдоль поверхности газ–жидкость. При этом одной из основных характеристик таких разрядов является скорость их движения над поверхностью жидкости, которая непосредственно определяется механизмом распространения разряда. Таким образом, измерение скорости движения разряда в зависимости от различных начальных параметров является одним из необходимых условий для построения соответствующих физических моделей его распространения. Существующие методы сверхскоростной съемки достаточно дорогостоящие и, кроме того, требуют большой интенсивности свечения разряда для его уверенной регистрации. В настоящей работе рассматриваются относительно простые методы, позволяющие определить скорость распространения разряда на основании несложных экспериментальных измерений.

1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Техническая вода 2 наливалась в кювету 1 размером 30×12 см, над которой располагался высоковольтный отрицательный электрод (катод) 5 в виде заостренного стержня. Плоский заземленный электрод (анод) 3 размещался непосредственно в жидкости у противоположной стенки кюветы. В качестве источника питания электрической схемы использовался импульсный модулятор 7, позволяющий получать квазипрямоугольные импульсы длительностью от 10 мкс до 1 мс. Выходное напряжение источника питания U_0 в импульсе изменялось от 7 кВ до 25 кВ, с шагом 250 В. Ограничение разрядного тока осуществляется балластным сопротивлением R_b 8, величина которого изменялась в пределах 1–8 кОм. Падение напряжения на разряде определялось при помощи омического делителя напряжения 6: $R_1 = 2$ МОм и $R_2 = 1$ кОм, а разрядный ток — при помощи шунта ($R_{sh} = 0.5$ Ом).

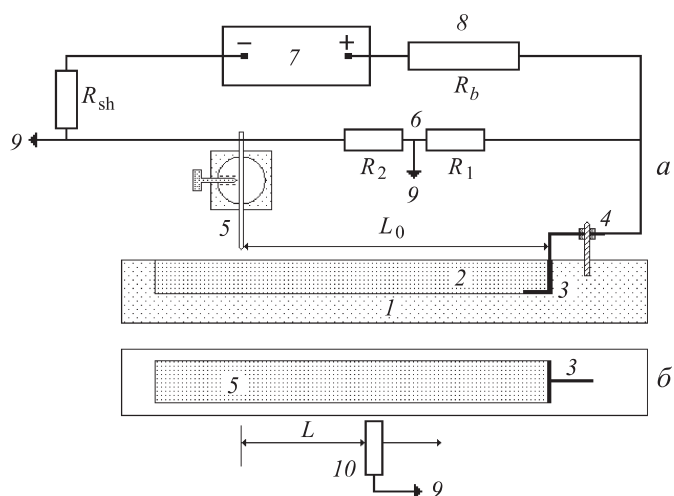


Рис. 1. Общая схема установки (а) и вид сверху (б): 1 — кювета из оргстекла, 2 — жидкость, 3 — анод, 4 — стойка, 5 — катод, 6 — делитель напряжения, 7 — источник питания, 8 — сопротивление балласта, 9 — к осциллографу, 10 — фотоумножитель

Сигналы с делителя напряжения и шунта подавались на два входа цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS-2004B. Киносъемка разряда проводилась цифровым фотоаппаратом.

2. Методы определения скорости

Следует отметить, что процесс первичного пробоя и распространения разряда от катода к аноду носит сугубо нестационарный характер. Поэтому в данных экспериментах основной параметр — время полного движения разряда между электродами [4] — находился как средняя величина, определяемая по результатам нескольких измерений (3, 5 и более). Затем находилась средняя статистическая ошибка, которая принималась и за ошибку измерений. Значения ошибки измерений, определенной таким образом, лежат в интервале 20–30%.

Самый простой метод заключается в определении средней скорости как отношения между длиной раз-

рядного промежутка L_0 и временем распространения разряда t_p : $V = L_0/t_p$. При этом время распространения определяется экспериментально из осциллограмм тока [4]. Основной недостаток этого метода заключается в том, что с его помощью невозможно определить скорость в различные моменты времени движения разряда.

Одним из способов определения скорости разряда является использование коллимированного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), который устанавливался перпендикулярно оси разряда на различных расстояниях L от катода (рис. 1, б). Таким образом, перемещая фотоумножитель параллельно оси разряда и измеряя время запаздывания прихода сигнала с ФЭУ относительно начала импульса разряда, т.е. время, за которое разряд достигал точки расположения ФЭУ, можно построить зависимость $L(t)$ (фактически измерялась зависимость $t(L)$). Дифференцированием этой зависимости можно получить значения $V(t)$. Пример такого определения скорости показан на рис. 2. Как видно из представленных графиков, величина скорости составляет ~ 800 м/с в начале движения разряда, а затем уменьшается до 250 м/с, оставаясь такой практически до конца его распространения, и только в области анода скорость возрастает до величины ~ 2000 м/с.

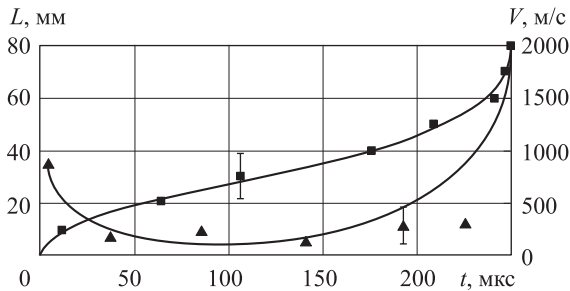


Рис. 2. Зависимости длины распространения разряда (квадраты) и скорости (треугольники) от времени, полученные при применении ФЭУ. $U_0 = 22$ кВ, $L_0 = 10$ см, $R_b = 1$ кОм

Следующий метод определения скорости распространения разряда основан на измерении суммарного сопротивления разряда и оставшейся части воды между разрядом и анодом, которое определялось как отношение измеренных значений напряжения и тока. В течение движения разряда от катода к аноду его собственное сопротивление увеличивается, а сопротив-

ление оставшейся части воды уменьшается. Так как в любой момент времени сопротивление каждой из этих частей пропорционально линейной длине участка, на котором оно определяется, то оказывается, что производная полного измеряемого сопротивления по времени пропорциональна скорости разряда и определяется по следующей формуле:

$$\frac{dR}{dt} = - \left(\frac{\rho_l}{S_l} - \frac{\rho_d}{S_d} \right) V,$$

где ρ_d/S_d и ρ_l/S_l — сопротивления единицы длины жидкости и разряда соответственно. Они определяются в предположении, что в начале весь ток течет по воде, поэтому начальное сопротивление, деленное на межэлектродное расстояние, позволяет найти величину ρ_l/S_l , а сопротивление в конце движения разряда — это сопротивление только разрядного канала — аналогично определяется величина ρ_d/S_d .

На рис. 3 приведены зависимости сопротивления разряда и скорости его распространения от времени. Как видно из рис. 3, скорость в начале и в конце движения разряда достигает величины ~ 1200 м/с, в остальное время скорость ~ 200 м/с.

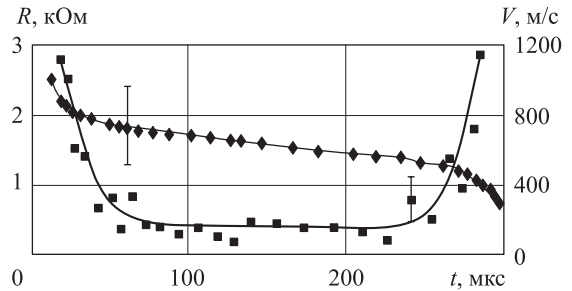


Рис. 3. Зависимости сопротивления разряда (ромбы) и скорости (квадраты) от времени. $U_0 = 22$ кВ, $L_0 = 10$ см, $R_b = 1$ кОм

Для определения скорости можно так же использовать данные киносъемки серии разрядов при различных длительностях импульса. Каждый кадр представлял собой интегральную по времени фотографию одного разряда при фиксированной длительности импульса. На основании таких кадров определялось максимальное расстояние, на которое успевает распространиться разряд за время импульса, затем по этим данным

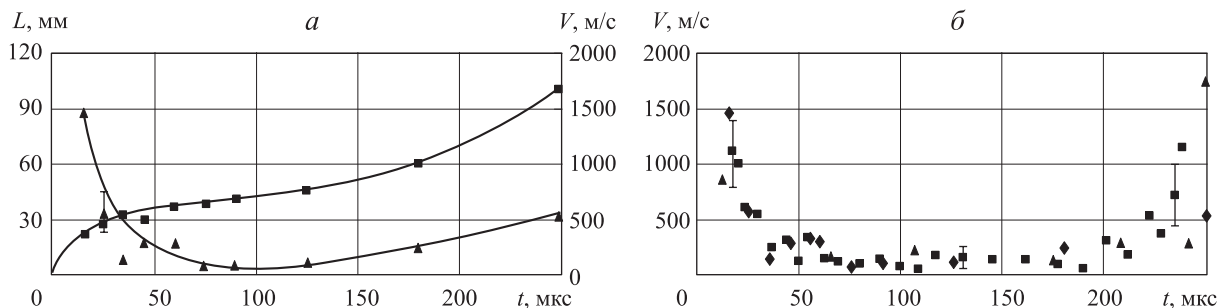


Рис. 4. (а) Квадраты — зависимость длины разряда от длительности импульса, треугольники — скорости распространения разряда от времени. (б) Скорость распространения разряда как функция времени: треугольники — метод с использованием ФЭУ, квадраты — определение скорости по полному сопротивлению, ромбы — метод киносъемки при различных длительностях импульса. $U_0 = 22$ кВ, $L_0 = 10$ см, $R_b = 1$ кОм

строилась зависимость длины разряда от длительности импульса $L = f(t)$ и путем ее дифференцирования определялась скорость движения разряда в данный момент времени. Вид этих зависимостей приведен на рис. 4, а. Видно, что, как и в предыдущих случаях, скорость разряда максимальна с области электродов и остается практически постоянной в пространстве между ними.

На рис. 4, б показано сравнение значений скоростей, полученных различными методами при одних и тех же условиях создания разряда. Как следует из представленных зависимостей, значения скорости разряда, определенные различными методами практически совпадают. Отметим, что величина средней скорости, определенной из соотношения $V = L_0/t_p$, для начальных условий, соответствующих рис. 2, равна — 350 м/с, а для рис. 3 — 400 м/с. Полученные по этой формуле средние значения скорости также совпадают с величиной скорости, определенной как среднее арифметическое для соответствующих зависимостей.

On-water sliding discharge velocity determine

D. N. Vaulin^a, A. A. Kvas, V. A. Chernikov^b

¹ *Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^avaud@yandex.ru, ^bvachernikov@rambler.ru.

Different methods, based on the certain experimental results, of the on-water sliding impulse discharge velocity determine are reviewed.

Keywords: discharge velocity, electrical discharge, sliding discharge.

PACS: 52.57.Di.

Received 14 September 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2010).

Сведения об авторах

1. Ваулин Дмитрий Николаевич — аспирант; тел.: (495) 939-38-85, e-mail: vaud@yandex.ru.

2. Квас Андрей Андреевич — студент; тел.: (495) 939-38-85, e-mail: kvasand@yandex.ru.

3. Черников Владимир Антонович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-38-85, e-mail: vachernikov@rambler.ru.

Заключение

Проведенные эксперименты и полученные результаты доказывают возможность применения всех исследованных методов для определения как среднего значения скорости распространения разряда от анода к катоду, так и мгновенного значения этой скорости и ее временной зависимости.

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. // Докл. АН СССР. 1989. **307**, № 6. С. 1370.
2. Белошеев В.П. // ЖТФ. 1998. **68**, № 7. С. 44.
3. Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Копьев В.А. и др. // Физика плазмы. 2006. **32**, № 11. С. 1048.
4. Александров А.Ф., Ваулин Д.Н., Ершов А.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 1. С. 95.