

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

**Распространение импульсного разряда над жидкостями
 с различным сопротивлением**

Д. Н. Ваулин^a, С. А. Каменщиков, В. А. Черников^b

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

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

Статья поступила 04.06.2010, подписана в печать 10.11.2010

Приводятся результаты экспериментальных исследований скорости распространения импульсного разряда в воздухе при атмосферном давлении над жидкостью при различных значениях ее сопротивления.

Ключевые слова: импульсный разряд, поверхность жидкости, скорость распространения, сопротивление, ток разряда.

УДК: 553.9:551.594. PACS: 52.75.Di.

Введение

Электрический разряд по поверхности воды или входящий воду является объектом, представляющим интерес для исследования как в связи с возможностью его различных технических применений (например, для очистки воды) [1], так и в связи с его природными проявлениями (разряд молний в воду или во влажную землю) [2, 3]. Однако механизм распространения такого разряда над поверхностью воды и скорость его движения в зависимости от различных начальных условий изучены не достаточно полно. Одним из таких начальных условий является собственное сопротивление жидкости, над которой происходит распространение разряда. В работе [2] указывается, что имеются верхняя и нижняя границы удельной электропроводности жидкости, ограничивающие область существования разряда, однако вопрос о том, чем определяются эти пределы, остается открытым. Поэтому целью настоящей работы было детальное экспериментальное изучение характера распространения импульсного разряда над поверхностью воды и ее растворов при достаточно широком диапазоне изменения сопротивления получаемых жидкостей.

Схема эксперимента

В экспериментах использовалась кювета из оргстекла, в которой была сделана полость, наполняемая водой или ее растворами [4]. Над водой располагался высоковольтный электрод (катод) в виде заостренного стержня. Плоский электрод (анод) размещался непосредственно в жидкости у противоположной стенки полости. Источником питания служил высоковольтный импульсный модулятор, вырабатывающий импульсы квазирядомоугольной формы длительностью $\tau = 10\text{--}800$ мкс. и максимальной амплитудой в импульсе до $U_0 = 30$ кВ. Последовательно с разрядом для ограничения тока включалось балластное сопротивление $R_b = 1\text{--}8$ кОм. Разрядный ток и падение напряжения

на разряде регистрировались при помощи низкоомного шунта ($R_s = 0.5$ Ом) и делителя напряжения (с коэффициентом деления 2000), сигналы с которых подавались на вход многоканального запоминающего осциллографа. Эксперименты проводились при высоте подъема катода над поверхностью воды $h = 5$ мм.

Для изменения сопротивления воды в нее добавлялись либо соляной раствор определенной концентрации (при этом сопротивление жидкости уменьшалось), либо спирт также определенной концентрации, что приводило к увеличению сопротивления жидкости. Кроме того, изменялось расстояние между электродами L , что позволяло дополнительно варьировать сопротивление жидкости. По полученным осциллограммам тока и падения напряжения определялось время движения разряда от катода к аноду и при данном расстоянии между электродами — средняя скорость его распространения. Кроме того, из аналогичных осциллограмм по значениям тока и напряжения в начальный момент времени, когда разряд еще не развился, определялось сопротивление жидкости, при этом не учитывалось сопротивление собственно разряда. Для обоснования возможности такого метода определения сопротивления жидкости были проведены дополнительные эксперименты, в которых сопротивление воды рассчитывалось по осциллограммам, полученным в случае, когда катод был полностью погружен в жидкость и разряд не развивался. Результаты таких экспериментов показаны на рис. 1. Видно, что значения сопротивлений жидкости, определенных по осциллограммам, полученных для двух случаев (с разрядом и с катодом, погруженным в воду), практически совпадают в пределах ошибки измерений. Поэтому в дальнейшем сопротивление жидкости определялось по указанному выше методу.

Результаты

В первом цикле экспериментов определялось время распространения разряда от катода к аноду (время второй стадии разряда [4]) над поверхностью воды,

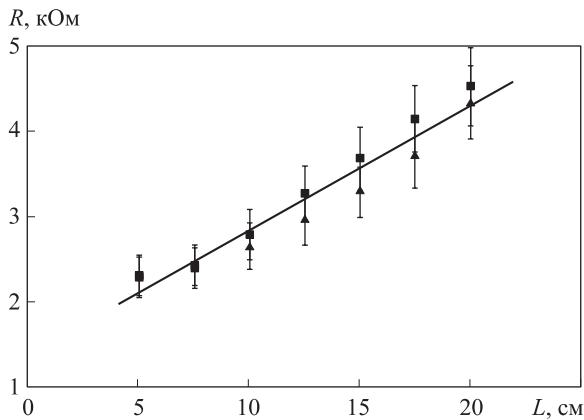


Рис. 1. Зависимость сопротивления воды от расстояния между электродами: ■ — катод над водой, ▲ — катод погружен в воду

в которую добавлялся соляной раствор определенной концентрации, что позволяло уменьшать сопротивление жидкости. На рис. 2 приведены зависимости времени второй стадии и сопротивления жидкости от концен-

трации соли в воде. Вследствие нестабильности разряда соответствующие точки на представленных графиках получались как средние значения, полученные по результатам нескольких измерений (как минимум трех). Поэтому практически во всех экспериментах ошибка измерений определялась как среднее статистическое отклонение и изменялась в пределах 20–30%. Как следует из представленных зависимостей, с увеличением концентрации соли в воде ее сопротивление падает (что вполне закономерно), а время распространения разряда растет. Таким образом, можно сделать вывод, что с падением сопротивления жидкости время второй стадии растет, и обратное утверждение о том, что с ростом сопротивления время его распространения уменьшается.

По известным значениям времени второй стадии и расстояния между электродами можно определить среднюю скорость распространения разряда как отношение L/t_2 , где t_2 — время движения разряда от катода к аноду, а L — межэлектродное расстояние.

Результаты таких расчетов приведены на рис. 3, *a* в виде зависимости средней скорости движения разряда

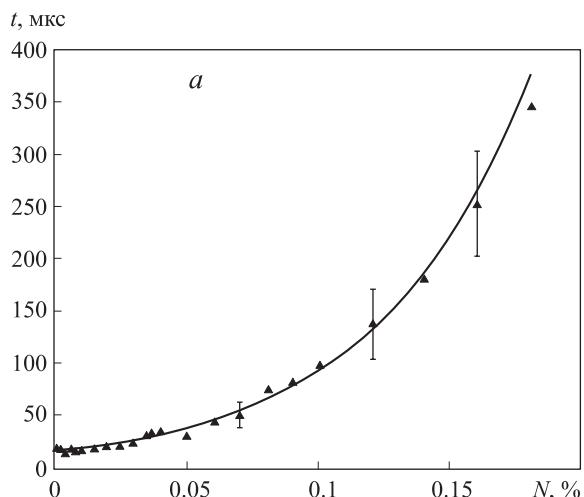


Рис. 2. Зависимость от концентрации соли в воде: *a* — времени распространения разряда, *б* — сопротивления жидкости. $U_0 = 20$ кВ, $R_b = 1$ кОм, $L = 6$ см

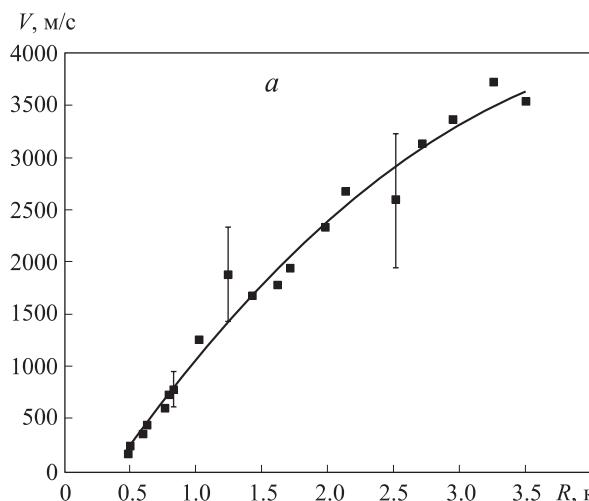
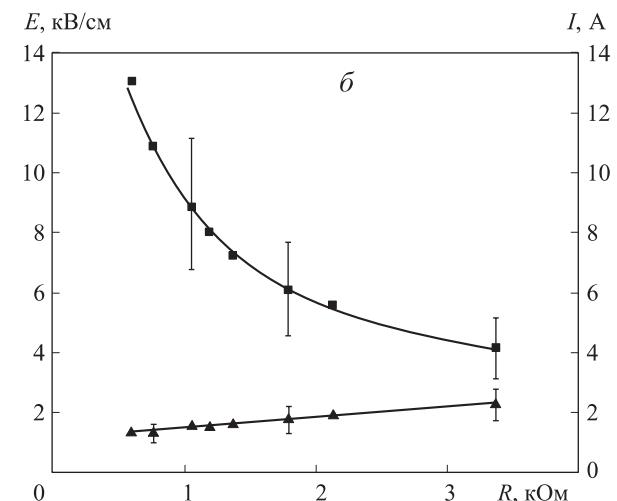


Рис. 3. Зависимости от сопротивления жидкости: *a* — скорости разряда, *б* — тока (■) и средней напряженности электрического поля (▲). $U_0 = 20$ кВ, $R_b = 1$ кОм, $L = 6$ см



от сопротивления жидкости, а на рис. 3, б приведены зависимости от сопротивления жидкости разрядного тока и средней напряженности электрического поля между электродами. Значения тока разряда определялись на начальный момент его распространения по соответствующим осциллографмам, а значения среднего поля рассчитывались по формуле $E_a = U_i/L$, где U_i — падение напряжения на разряде в начальный момент его развития.

Как видно из рис. 3, а, скорость распространения разряда растет с увеличением сопротивления жидкости, т. е. с уменьшением концентрации соли в воде. Если предположить, что скорость разряда определяется главным образом величинами разрядного тока и средней напряженности электрического поля, то такое увеличение скорости при росте сопротивления жидкости, очевидно, можно объяснить возрастанием средней напряженности электрического поля. Действительно, согласно рис. 3, б, в данном интервале изменений сопротивления жидкости ток разряда падает при увеличении ее сопротивления, в то время как напряженность поля растет, что соответствует росту скорости разряда. Таким образом, можно утверждать, что в исследованном диапазоне изменения сопротивления жидкости основным факто-

ром, определяющим скорость распространения разряда, является средняя напряженность электрического поля.

Для того чтобы определить зависимость скорости движения разряда от сопротивления жидкости в условиях, когда оно значительно превышает сопротивление балласта, исследовался характер разряда над водными растворами спирта. Известно, что добавка спирта в воду увеличивает ее сопротивление, так как чистый спирт является хорошим диэлектриком, поэтому, изменяя количество добавленного спирта, можно также изменять и сопротивление воды.

На рис. 4 приведены зависимости времени второй стадии разряда и сопротивления раствора в зависимости от концентрации спирта в нем. Эксперименты проводились при различных расстояниях между электродами. Соответствующие точки на графиках, как и ранее, определялись по усреднению результатов нескольких измерений. Однако при больших концентрациях спирта и больших межэлектродных расстояниях разряд становился более нестабильным, что приводило к увеличению ошибки измерений до величины $\sim 40\%$.

Видно, что в этом случае и время распространения разряда сопротивление жидкости растут с увеличением концентрации спиртового раствора. Причем чем больше

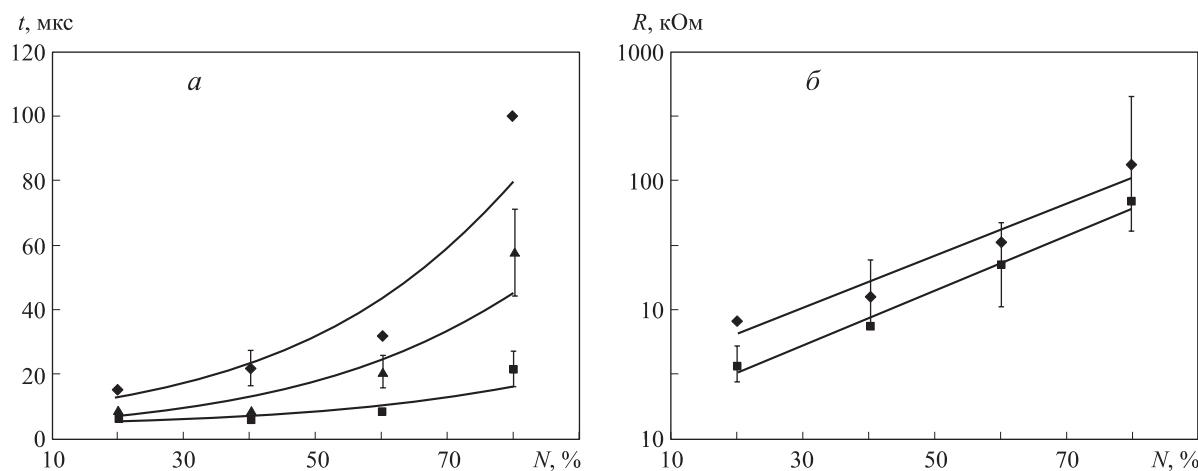


Рис. 4. Зависимость от концентрации спирта: а — времени распространения разряда, б — сопротивления жидкости. $L = 6$ см ◆, 5 см ▲, 4 см ■; $U_0 = 20$ кВ, $R_b = 1$ кОм

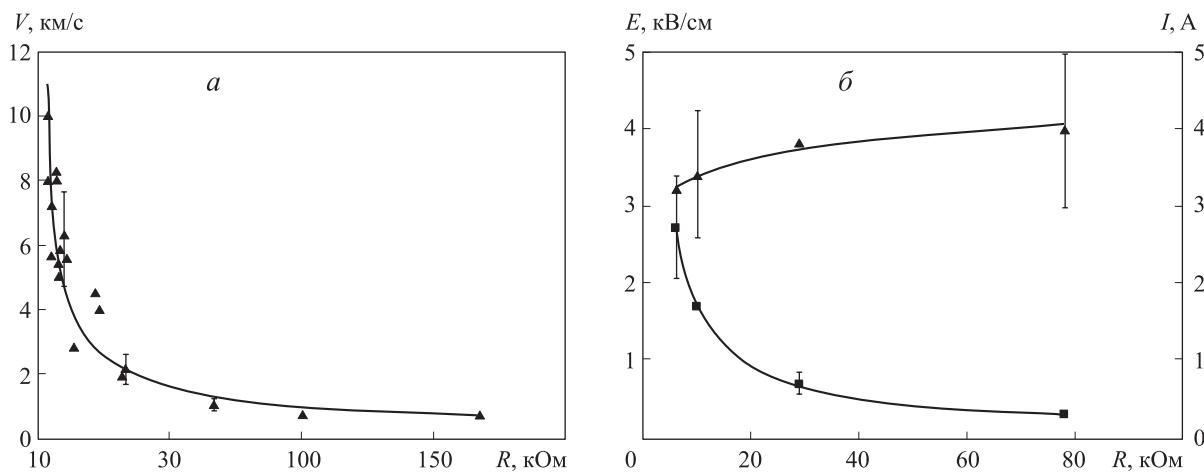


Рис. 5. Зависимости от сопротивления жидкости: а — скорости разряда, б — тока (■) и средней напряженности электрического поля (▲). $U_0 = 20$ кВ, $R_b = 1$ кОм, $L = 6$ см

расстояние между электродами, тем больше значения при данной концентрации спирта как времени второй стадии, так и сопротивления жидкости.

Как и в предыдущем случае, по известным величинам времени второй стадии, расстоянию между электродами и осциллограммам тока и падения напряжения на разряде можно определить средние значения скорости распространения разряда, напряженности электрического поля и тока разряда. Результаты таких расчетов приведены на рис. 5.

Как следует из рис. 5, а, скорость распространения разряда падает с увеличением сопротивления жидкости, т. е. с увеличением концентрации спирта в воде. В то же время, согласно рис. 5, б, в данном интервале изменений сопротивления жидкости напряженность поля растет, в то время как ток разряда падает при увеличении сопротивления жидкости, что совпадает с падением скорости разряда. Таким образом, можно утверждать, что в исследованном диапазоне изменения сопротивления жидкости основным фактором, определяющим скорость распространения разряда, является величина разрядного тока.

Следует отметить, что падение скорости распространения разряда над поверхностью воды при увеличении ее сопротивления наблюдалось во многих экспериментах (см., например, [5–7]), в которых приводится следующая зависимость для скорости разряда $V \sim I^k$, где I — величина разрядного тока. Однако, как показали настоящие эксперименты, такая зависимость не является универсальной, а именно имеется некоторая область значений сопротивления жидкости и, следовательно,

величин тока разряда, в которой скорость разряда падает с ростом разрядного тока.

Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные результаты показывают, что в общем случае скорость распространения разряда над поверхностью жидкости зависит не только от величины разрядного тока, но и от средней напряженности электрического поля. Причем величина тока является определяющей для скорости распространения разряда при больших значениях сопротивления жидкости, в то время как при относительно малых сопротивлениях определяющим фактором служит напряженность электрического поля в области разряда.

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

Список литературы

1. Белошеев В.П. // ЖТФ. 1996. **66**, № 8. С. 50.
2. Шмелев В.М., Марголин А.Д. // ТВТ. 2003. **41**, № 6. С. 831.
3. Anpilov F.M., Barkhudarov E.M., Kop'ev V.A., Kossyi I.A. // 28th ICPIG. July 15–20, 2007. Prague, Czech Republic. N 10.
4. Александров А.Ф., Ваулин Д.Н., Ершов А.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 1. С. 1.
5. Э.М., Райзэр Ю.П. Искровой разряд. М., 1997. С. 320.
6. Базелян Э.М. // Электричество. 1991. № 11. С. 27.
7. Базелян Э.М., Хлапов А.В., Шкилев А.В. // Электричество. 1992. № 9. С. 19.

Impact discharge propagation over various resistance liquid

D. N. Vaulin^a, S. A. Kamenschikov, V. A. Chernikov^b

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

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

The experimental study results of the impact atmospheric discharge propagating over the liquid surface velocity dependence from liquid resistance are presenting.

Keywords: impact discharge, liquid surface, propagating velocity, resistance, discharge current.

PACS: 52.75.Di.

Received 4 June 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2011).

Сведения об авторах

1. Ваулин Дмитрий Николаевич — аспирант; тел.: (495) 939-38-85, e-mail: vaud@yandex.ru.
2. Каменщиков Сергей Александрович — мл. науч. сотр.; тел.: (495) 939-38-85.
3. Черников Владимир Антонович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-38-85, e-mail: vachernikov@rambler.ru.