

Влияние сопротивления жидкости на скорость распространения над ней импульсного разряда

А. Ф. Александров, Д. Н. Ваулин^a, А. А. Квас, 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: ^avauud@yandex.ru, ^bvachernikov@rambler.ru

Статья поступила 19.07.2010, подписана в печать 15.09.2010

Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований скорости распространения импульсного разряда в воздухе при атмосферном давлении над жидкостями с различными проводимостями.

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

УДК: 553.9:551.594. PACS: 52.75.Di.

Введение

Изучение импульсного электрического разряда, разывающегося по поверхности воды, другой жидкости или влажного грунта, представляет интерес в связи с возможностью его различных технических применений, например для очистки воды [1, 2], при разработке и создании систем молниезащиты и др. [3–5]. При этом определенное внимание уделяется возможности достижения максимального расстояния, на которое распространяется разряд при заданном начальном напряжении в импульсе. Очевидно, что линейные размеры L разряда определяются скоростью его распространения V согласно простому соотношению $L = V\tau$, где τ – длительность импульса. Однако зависимость скорости движения разряда от собственного сопротивления жидкости, над которой происходит его распространение, до конца не исследована. В работе [6] отмечается, что имеются верхняя и нижняя границы удельной электропроводности жидкости, ограничивающие область существования разряда, однако вопрос о том, чем определяются эти пределы, остается открытым. Из простых физических соображений следует, что при условиях, когда сопротивление жидкости $R_w \rightarrow 0$ либо $R_w \rightarrow \infty$, скорость распространения разряда стремится к нулю. Таким образом, при каких-то значениях сопротивления жидкости скорость распространения разряда должна достигать максимального значения. Поэтому целью

настоящей работы было детальное экспериментальное исследование средней скорости распространения импульсного разряда над поверхностью дистиллированной воды с добавками соляного раствора различной концентрации, что позволило практически непрерывно и в широком диапазоне значений изменять сопротивление получаемых растворов.

1. Схема эксперимента

Экспериментальные измерения проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Использовалась кювета из оргстекла 1, в которой была сделана полость, наполняемая дистиллированной водой или ее растворами 2. Над жидкостью располагался высоковольтный электрод (катод) в виде заостренного стержня 5. Плоский электрод (анод 3) при помощи стойки 4 размещался частично в воздухе у противоположной стенки полости. Источником питания 8 служил высоковольтный импульсный генератор, вырабатывающий импульсы квазипрямоугольной формы длительностью $\tau = 10\text{--}800$ мкс. и максимальной амплитудой в импульсе U_0 до 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 с сопротивлением ($R_s = 0.5$ Ом) и делителя напряжения 6

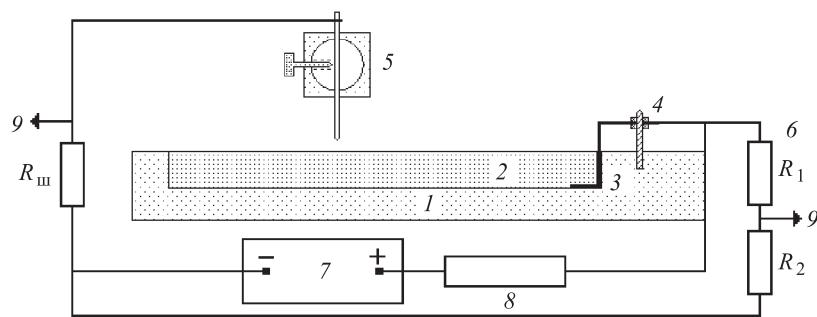


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – диэлектрическая кювета, 2 – жидкость, 3 – анод, 4 – крепление анода, 5 – катод, 6 – делитель напряжения, 7 – источник напряжения, 8 – балластное сопротивление, 9 – сигналы на осциллограф

с коэффициентом деления 2000, сигналы с которых подавались 9 на вход многоканального запоминающего осциллографа. Эксперименты проводились при расстоянии от катода до поверхности воды $h = 5$ мм.

В качестве жидкости использовался соляной раствор определенной концентрации в дистиллированной воде, что позволяло в широких пределах (от 100 Ом до 300 кОм) изменять ее сопротивление. При этом, говоря об изменении интегральной величины — сопротивления за счет изменения проводимости жидкости, мы предполагаем каждый раз, что геометрия разрядного промежутка остается неизменной. Заметим, что сопротивление жидкости можно было также изменять и меняя геометрию разрядного промежутка путем вариации расстояния между электродами. Предварительные эксперименты показали [7], что можно выделить три стадии развития разряда над поверхностью жидкости. Первая стадия соответствует линейному пробою между катодом и жидкостью. Во время второй стадии происходит распространение разряда от катода к аноду, которое заканчивается замыканием разряда на анод и формированием высокопроводящего плазменного канала. Затем до конца импульса реализуется третья стадия развития разряда — стадия протекания тока через полностью сформированный между анодом и катодом разрядный канал. По полученным ВАХ определялось время второй стадии разряда, а при данном расстоянии между электродами — средняя скорость его распространения. Кроме того, по осцилограммам определялись величины начального сопротивления жидкости и средней напряженности электрического поля между электродами.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В экспериментах в основном определялось время второй стадии распространения разряда над поверхностью дистиллированной воды с добавками соляного раствора. На рис. 2 приведены типичные зависимости этого времени и сопротивления жидкости от концентрации соли в воде при различных значениях балластного сопротивления. Разряд носил нестабильный

характер, вследствие чего соответствующие точки на представленных графиках получались как средние значения по трем измерениям, при этом ошибка измерений составляла 20–30%. Как следует из представленных зависимостей, с увеличением концентрации соляного раствора его сопротивление падает, а время распространения разряда сначала уменьшается до некоторого минимума, а затем растет. Таким образом, зависимость времени второй стадии от сопротивления жидкости имеет минимум.

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

Результаты таких расчетов приведены на рис. 3, а в виде зависимости средней скорости движения разряда от сопротивления жидкости R_w при различных значениях балластного сопротивления R_b . На рис. 3, б приведены аналогичные зависимости от отношения сопротивления жидкости к сопротивлению балласта R_w/R_b .

Как видно из рис. 3, а, зависимость скорости распространения разряда от сопротивления жидкости имеет максимум. Причем этот максимум соответствует тем большему сопротивлению жидкости, чем больше сопротивление балласта. В то же время из рис. 3, б следует, что скорость распространения разряда достигает максимального значения при одном и том же значении отношения сопротивления жидкости к сопротивлению балласта, а именно при $R_w/R_b = 4$, независимо от величины последнего.

Были также проведены эксперименты по определению средней скорости распространения разряда над поверхностью технической воды с добавками либо соляного раствора (что позволяло уменьшать начальное сопротивление жидкости), либо определенной концентрации спирта (что приводило к увеличению начального сопротивления). Сравнение результатов по определению скорости разряда, полученных для соляных растворов в дистиллированной и технической воде и спиртовых растворах, приведены на (рис. 4, а). Достаточно хоро-

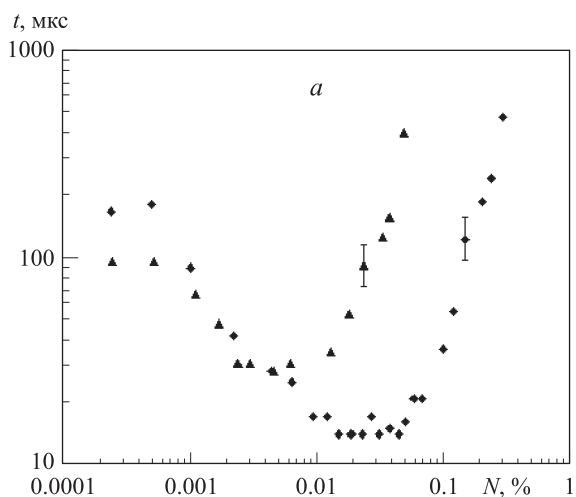
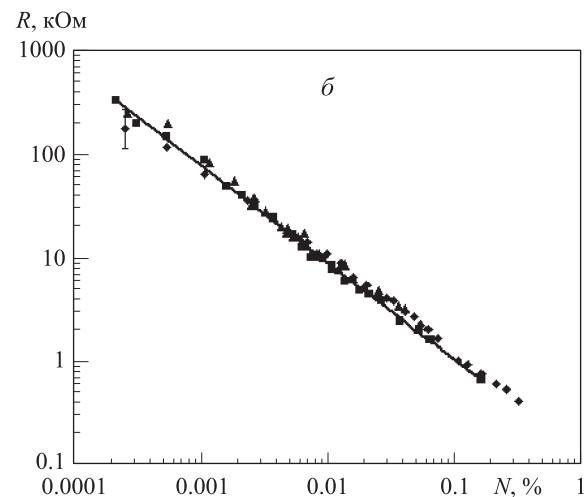


Рис. 2. Зависимости от концентрации соли: a — времени второй стадии разряда, β — начального сопротивления раствора. $L = 5$ см. \blacklozenge — $R_b = 1$ кОм, \blacksquare — $R_b = 2$ кОм, \blacktriangle — $R_b = 4$ кОм, $U_0 = 17$ кВ, $U_0 = 20$ кВ



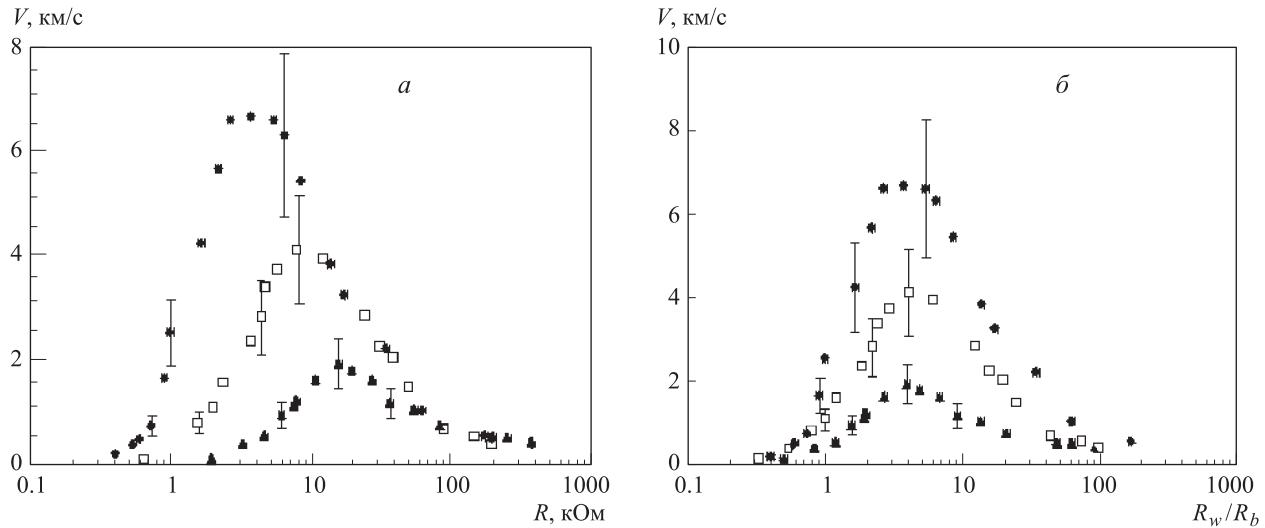


Рис. 3. Зависимости скорости распространения разряда от: а — начального сопротивления раствора, б — отношения сопротивления жидкости к сопротивлению балласта. $L = 5$ см, ■ — $R_b = 1$ кОм, $U_0 = 17$ кВ, □ — $R_b = 2$ кОм, ▲ — $R_b = 4$ кОм, $U_0 = 20$ кВ

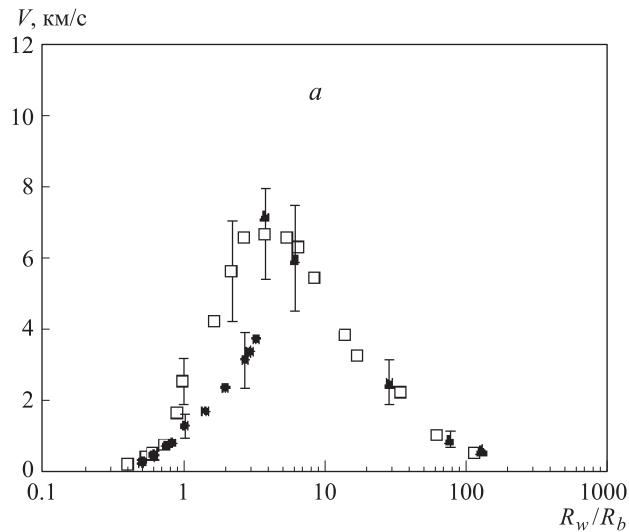


Рис. 4. Зависимости от отношения сопротивления жидкости к сопротивлению балласта: а — скорости распространения разряда: растворы соли в технической (■) и дистиллированной воде (□), спирта в технической воде (▲); $R_b = 1$ кОм, $U_0 = 20$ кВ, $L = 5$ см; б — начального тока разряда (■) и средней напряженности электрического поля (▲); $R_b = 2$ кОм, $U_0 = 20$ кВ, $L = 5$ см

шее совпадение результатов, полученных в различных экспериментах, еще раз подтверждает вывод о том, что скорость распространения разряда при определенных значениях R_w/R_b достигает максимального значения.

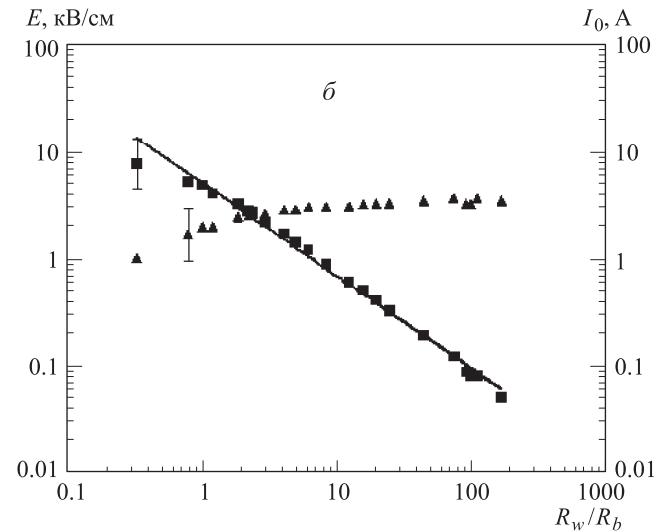
Вполне естественно следует предположить, что основными параметрами, определяющими скорость распространения разряда, являются величина разрядного тока и средняя напряженность электрического поля в головной части движущегося разряда, поэтому необходимо рассмотреть зависимости этих параметров от сопротивления жидкости. На рис. 4, б представлены зависимости начальных значений тока разряда и средней напряженности электрического поля от отношения R_w/R_b . При этом начальный ток разряда определялся по соответствующим осцилограммам, а значение средней напряженности оценивалось как $E_i = U_i/L$, где U_i — начальное падение напряжения на разряде, опреде-

ляемое из осцилограмм, а L — расстояние между электродами.

Из рис. 4, б следует, что при малых значениях R_w/R_b величина начального тока падает, в то время как средняя напряженность электрического поля растет. Отсюда можно сделать вывод, что при малых значениях R_w/R_b скорость распространения разряда определяется напряженностью электрического поля.

При больших же значениях R_w/R_b средняя напряженность электрического поля (в пределах статистической ошибки) остается практически постоянной, а величина тока разряда падает. Следовательно, можно сделать вывод, что при больших значениях R_w/R_b скорость распространения разряда определяется разрядным током.

Таким образом, на основании полученных результатов можно предположить, что средняя скорость рас-



пространения разряда пропорциональна произведению начальных значений тока разряда I_i и средней напряженности E_i электрического поля: $V \sim I_i E_i$. Однако последнее выражение пропорционально отношению мощности, выделяемой в разрядном промежутке, к его длине, и его максимальное значение достигается при $R_w = R_b$, в то время как в экспериментах максимум скорости наблюдается при $R_w = 4R_b$.

В этом случае можно предположить, что величина скорости определяется соотношением

$$V = C I_i^k E_i^m,$$

где C — коэффициент пропорциональности, а показатели степени k и m могут принимать некоторые значения. В этом случае ток разряда равен $I_i = U_0 / (R_w + R_b)$, где U_0 — начальное напряжение в импульсе, а средняя начальная напряженность электрического поля $E_i = U_i / L = I_i R_w / L = U_0 R_w / ((R_w + R_b) L)$. Тогда для определения скорости получаем следующее соотношение:

$$V = C U_0^{k+m} R_w^m / ((R_w + R_b)^{k+m} L^m). \quad (1)$$

Для определения показателя степени k воспользуемся аппроксимацией выражения (1), полученной при условии $R_w \gg R_b$. В этом случае получаем, что скорость разряда определяется соотношением:

$$V = C (U_0^{k+m} / L^m) R_w^{-k}.$$

Таким образом, при условии $R_w \gg R_b$ скорость разряда равна $V = C_2 R_w^{-k}$, где $C_2 = C (U_0^{k+m} / L^m)$, т.е. $V = V(R_w^{-k})$. Следовательно, коэффициент k можно определить из зависимости V от R_w , полученной экспериментально при условии $R_w \gg R_b$. Вид такой зависимости показан на рис. 5.

Уравнение кривой, аппроксимирующей данную зависимость, имеет вид $V = 3 \cdot 10^4 \cdot R_w^{-0.8}$, откуда можно получить, что $k = 0.8$ и скорость распространения разряда $V \sim I^{0.8}$.

Величину коэффициента m можно найти из условия максимума функции $V(R_w)$, которое легко получается обычным образом путем дифференцирования выражения (1). В итоге получаем

$$R_w = (m/k) R_b.$$

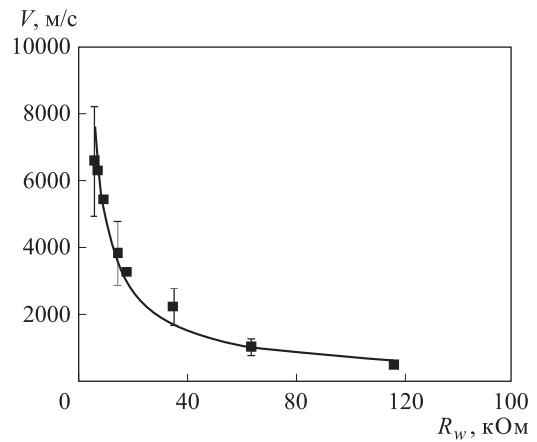


Рис. 5. Зависимость средней скорости распространения разряда от сопротивления жидкости при $R_w \gg R_b$.
 $R_b = 1$ кОм, $U_0 = 17$ кВ, $L = 5$ см

Таким образом, максимум скорости, определяемой выражением (1), соответствует условию $R_w = (m/k) R_b$. В то же время, согласно экспериментальным данным, максимум скорости разряда регистрируется при $R_w = 4R_b$. Из этих двух условий следует, что $m/k = 4$, или $m = 4k$, т.е. при $k = 0.8$ коэффициент $m = 3.2$.

Таким образом, в выражении (1) остается неизвестной константа C . Для ее определения можно воспользоваться экспериментальными результатами, полученными для сопротивления балласта $R_b = 1$ кОм. Подставляя в формулу (1) известные значения скорости распространения разряда, начального напряжения в импульсе, расстояния между электродами, сопротивления жидкости, а также известные значения коэффициентов m и k , можно определить значения константы C . Полученное таким методом среднее значение искомой постоянной равно $C = 45$ при средней расчетной относительной ошибке $\pm 40\%$.

Таким образом, получаем следующую полуэмпирическую формулу, связывающую среднюю скорость распространения разряда с сопротивлением жидкости:

$$V = 45 U_0^4 R_w^{3.2} / ((R_w + R_b)^4 L^{3.2}). \quad (2)$$

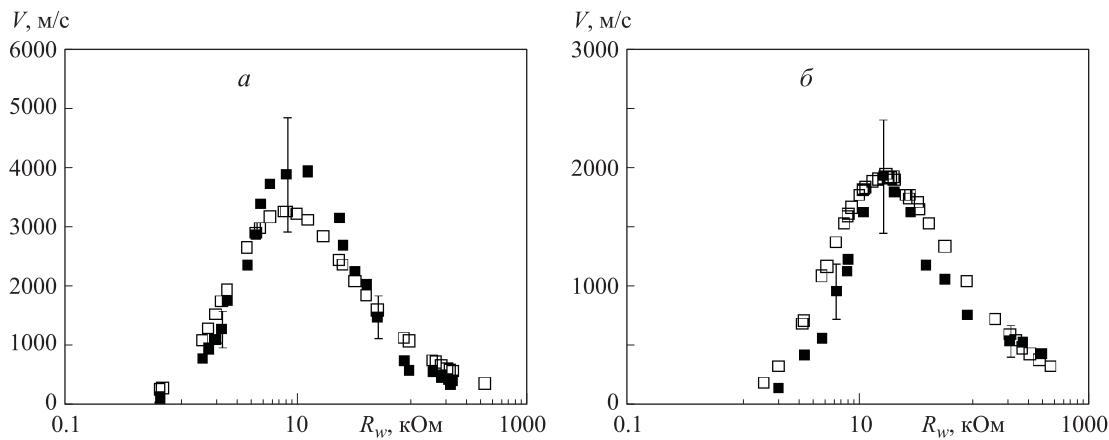


Рис. 6. Зависимости средней скорости распространения разряда от сопротивления жидкости. $U_0 = 20$ кВ, $L = 5$ см. ■ — экспериментальные значения, ○ — рассчитанные по формуле (2): а — $R_b = 2$ кОм, б — $R_b = 4$ кОм

Сравнение экспериментальных зависимостей $V(R_w)$, полученных при различных значениях балластных сопротивлений, и зависимости $V(R_w)$, полученной по данной формуле, представлено на рис. 6, где видно, что наблюдается удовлетворительное (в пределах ошибок измерений) соответствие между экспериментальными и расчетными величинами. Полученный результат свидетельствует о возможности использования предложенной полуэмпирической формулы (2) для объяснения экспериментальных результатов.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что скорость распространения разряда над поверхностью жидкости сложным образом зависит от ее сопротивления, причем ее максимальное значение в условиях данных экспериментов достигается при сопротивлении жидкости $R_w = 4R_b$, где R_b — величина сопротивления балласта. Предложена полуэмпирическая формула для зависимо-

сти скорости от сопротивления жидкости, удовлетворительно объясняющая экспериментальные результаты.

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

Список литературы

1. Белошев В.П. Устройство для обеззараживания питьевой и сточной воды. Патент РФ № 2042641 от 14.05.92.
2. Шмелев В.М., Евтихов Н.В., Козлов Ю.Н., Бархударов Э.М. // Хим. физика. 2004. **23**, № 9. С. 77.
3. Базелян Э.М. // Электричество. 1991. № 11. С. 27.
4. Базелян Э.М., Хлапов А.В., Шкилев А.В. // Электричество. 1992. № 9. С. 19.
5. Резинкина М.М. Князев В.В., Кравченко В.И. // ЖТФ. 2007. **77**, № 8. С. 44.
6. Шмелев В.М., Марголин А.Д. // ТВТ. 2003. **41**, № 6, С. 831.
7. Александров А.Ф., Ваулин Д.Н., Ериков А.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 1. С. 1.

Liquid resistance influence on velocity of impact discharge propagation over it

A. F. Aleksandrov, D. N. Vaulin^a, A. A. Kvas, 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 and theoretical study results of the impact atmospheric discharge propagating over the liquid surface velocity dependence from its conductivity are presenting.

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

PACS: 52.75.Di.

Received 19 July 2010.

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

Сведения об авторах

1. Александров Андрей Фёдорович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-25-74.
2. Ваулин Дмитрий Николаевич — аспирант; тел.: (495) 939-38-85, e-mail: vaud@yandex.ru.
3. Квас Андрей Андреевич — студент.; тел.: (495) 939-38-85.
4. Черников Владимир Антонович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-38-85, vachernikov@rambler.ru.