

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Распространение импульсного разряда над поверхностью жидкости при наличии преградА. Ф. Александров, В. Л. Бычков, Д. Н. Ваулин^а, В. А. Черников*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*

Статья поступила 04.12.2014, подписана в печать 10.03.2015.

Настоящая работа является продолжением цикла экспериментов по исследованию импульсного разряда, распространяющегося над поверхностью жидкости [1–5]. Проведено детальное исследование влияния диэлектрических преград на характер распространения импульсного разряда над поверхностью воды. Показано, что присутствие преград приводит к возрастанию необходимого для распространения разряда начального напряжения в импульсе. При этом определяющую роль играет преграда, ближайшая к острейшему электроду.

Ключевые слова: импульсный разряд, поверхность жидкости, диэлектрическая преграда.

УДК: 553:9:551.594. PACS: 52.75.Di.

Введение

В последние десятилетия выполнено большое число работ, посвященных разряду, распространяющемуся над поверхностью жидкости [1–12]. Это связано, прежде всего, с возможностью применения такого типа разряда в различных практических целях: электроразрядная очистка воды [13, 14], обработка материала твердого электрода [15], инициирование реакций в жидкости с использованием активных частиц, образующихся в газовой фазе [11, 16], определение средств молниезащиты [17]. Как показали многочисленные эксперименты, скорость распространения такого типа разряда может принимать значения из широкого диапазона 10^2 – 10^5 м/с. Большие скорости могут быть объяснены плазменными процессами [18]. Для объяснения скоростей из нижней части этого диапазона в работе [19] была предложена газодинамическая модель. Согласно этой модели распространение разряда над поверхностью жидкости носит дискретный характер. Чтобы проверить, может ли разряд распространяться скачками (дискретно), были проведены эксперименты с диэлектрическими преградами, нарушающими непрерывный контакт канала разряда с жидкостью.

Для создания разряда использовался генератор,

позволяющий получать импульсы квазипрямоугольной формы длительностью 10–1000 мкс при начальном напряжении в импульсе 5–30 кВ. Подробное описание используемой экспериментальной установки приведено в работах [3, 20].

В экспериментах использовались преграды, которые были выполнены из диэлектрической лески (проволочки) и покрыты лаком, чтобы предотвратить их смачивание водой. Диаметр преград изменялся в пределах 0.9–2 мм, расстояние между преградами во всех экспериментах было кратно 1 см. Длины преград были больше поперечных размеров кюветы с водой, что позволяло полностью перекрыть поверхность воды. Преграды размещались таким образом, что их нижние части смачивались водой, а верхние находились в воздухе (рис. 1).

Эксперименты проводились при различных значениях начальных параметров, таких как длительность импульса разряда, напряжение в импульсе, величина балластного сопротивления, включенного в электрическую цепь разряда, диаметр преграды d , расстояние по горизонтали от катода до преграды x , количество преград n . Для регистрации процесса распространения разряда фиксировались осциллограммы разрядного тока и падения напряжения, кроме того, использовались интегральные фотографии

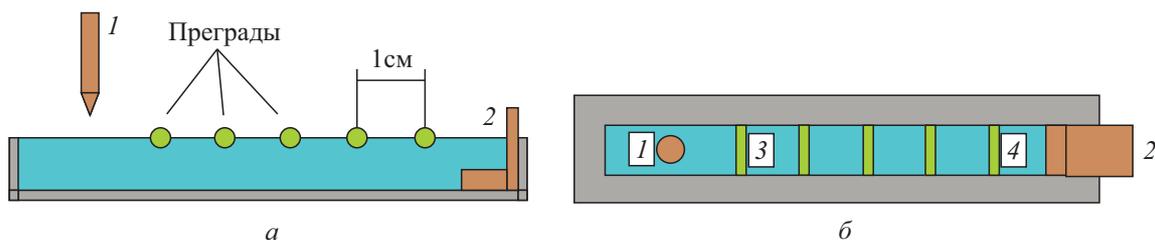


Рис. 1. Схема размещения преград: а — вид с боку; б — вид сверху (1 — острейший электрод (катод); 2 — анод; 3 — преграда, ближайшая к катоду; 4 — преграда, ближайшая к аноду)

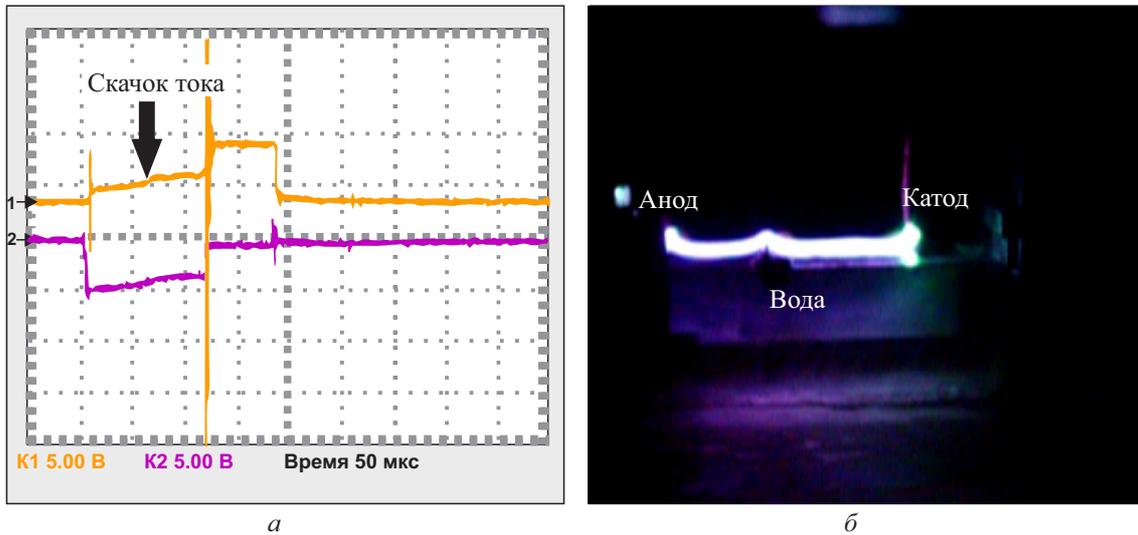


Рис. 2. *а* – Осциллограммы тока (1) и напряжения (2). $L = 60$ мм, $\tau = 200$ мкс, $U_0 = 12.9$ кВ, $R = 1$ кОм, $x = 2.5$ см, $d = 2$ мм. Цена большого деления по горизонтали 50 мкс/дел, а по вертикали: для тока 10 А/дел, для напряжения 10 кВ/дел. Осциллограмма напряжения инвертирована. *б* – Фотография разряда

разряда. На рис. 2 приведены типичные осциллограммы разрядного тока и падения напряжения на разряде для случая размещения одной преграды на расстоянии 2.5 см от катода. На этом же рисунке показана интегральная фотография разряда. На осциллограммах (рис. 2, *а*) виден скачок тока в момент достижения разрядом преграды. На интегральной фотографии разряда (рис. 2, *б*) видно, как разряд огибает преграду.

На основании результатов, представленных на рис. 2, можно сделать вывод о том, что при своем распространении разряд перескакивает через преграду, при этом теряется его непрерывный электрический контакт с проводящей водой. Таким образом, движение разряда может происходить скачкообразно, т. е. носит дискретный характер, как и следует из модели его распространения, предложенной в работе [19].

Проведенные эксперименты показали, что завершённый разряд реализуется в случае наличия преграды при больших значениях начального напряжения в импульсе, чем без нее. Так, на рис. 3, *а* представлена зависимость минимального начального напряжения, необходимого для реализации завершённого разряда, от положения одной преграды относительно катода при различных значениях диаметра диэлектрической проволоочки. Расстояние x отсчитывалось от катода. На приведенных рисунках L – расстояние между электродами, H – высота подъема катода над водой.

Из представленных результатов следует, что, во-первых, минимальное начальное напряжение, необходимое для реализации завершённого разряда, растет с ростом диаметра преграды и, во-вторых, оно падает по мере удаления преграды от катода. Полученные зависимости можно объяснить на основании газодинамического механизма распространения разряда [19]. Действительно, наличие преграды

увеличивает расстояние между каналом и поверхностью воды, по которому происходит микропробой. Поскольку величина пробойного значения напряженности электрического поля в воздухе постоянна ($E = 30$ кВ/см), то увеличение расстояния, по которому происходит пробой, приводит к увеличению необходимого минимального напряжения в импульсе. Таким образом, чем больше диаметр преграды, тем больше напряжение, при котором реализуется распространение разряда. В то же время при удалении преграды от катода при постоянном начальном напряжении возрастает величина напряженности электрического поля между головной частью разряда и анодом; поэтому минимальное начальное напряжение, необходимое для реализации завершённого разряда, при этом падает и в пределе стремится к минимальному напряжению, необходимому для реализации завершённого разряда в воде без преград.

На рис. 3, *б* представлены типичные зависимости минимального значения напряжения необходимого для реализации завершённого разряда от количества преград, находящихся на пути его распространения. Преграды размещались равномерно: для графика 1 первая – на расстоянии 10 мм от катода (рис. 1, *б*, поз. 3), а каждая последующая на расстоянии 10 мм от предыдущей. Для графика 2 первая – на расстоянии 10 мм от анода (рис. 1, *б*, поз. 4), а каждая последующая также на расстоянии 10 мм от предыдущей. Из приведенных зависимостей следует, что увеличение числа преград приводит к соответствующему росту начального минимального напряжения необходимого для реализации завершённого разряда между электродами. Видно, что, когда увеличение числа преград начинается от анода 2, минимальное пробойное напряжение растет практически линейно при увеличении их числа. В случае, когда число преград увеличивается от катода 1, рост минималь-

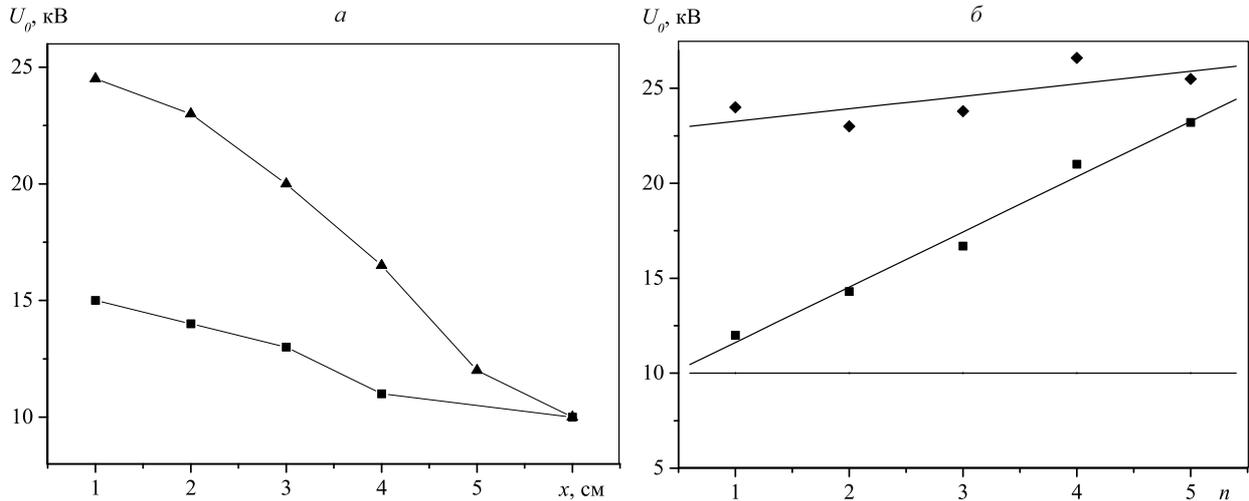


Рис. 3. Зависимость минимального начального напряжения от: *a* — положения одной преграды относительно катода, квадраты — $d = 0.9$ мм, треугольники — $d = 2$ мм; *б* — количество преград: 1 — преграды размещались от катода к аноду, 2 — от анода к катоду, 3 — значение минимального напряжения для воды без преград; $L = 60$ мм, $\tau = 500$ мкс, $H = 5$ мм, $R = 1$ кОм

ного напряжения оказывается достаточно слабым: в пределах ошибки, это напряжение остается практически постоянным. Из этого также следует, что чем ближе преграда находится к катоду, тем сильнее она затрудняет распространение разряда.

Для более полного выяснения влияния преград и их положения по отношению к электродам на характер распространения разряда были проведены эксперименты, в которых по осциллограммам разрядного тока определялось время распространения разряда от катода к аноду при различном числе преград и различном их расположении. Метод определения полного времени движения разряда от катода к аноду подробно изложен в работе [3].

На рис. 4. представлены зависимости времени распространения разряда от анода к катоду Δ_2 от начального напряжения U_0 для случая, когда сначала были размещены все преграды, а затем их по одной убирали начиная с ближайшей к катоду.

На основании результатов, приведенных на рис. 4, можно сделать ряд выводов. Во-первых, видно, что независимо от числа преград время распространения разряда падает с увеличением начального напряжения в импульсе и, следовательно, скорость его движения растет. Этот факт согласуется с результатами многих экспериментов, выполненных ранее [1–3]. Во-вторых, из данных рис. 4 видно, что при фиксированном напряжении время движения разряда растет с увеличением числа преград. В-третьих, из полученных результатов следует, что для реализации определенной скорости движения разряда (что при постоянном расстоянии между электродами соответствует реализации соответствующего определенного времени распространения разряда от анода к катоду) при увеличении числа преград требуется рост напряжения в инициирующем импульсе. Эта экспериментальная зависимость подтверждает вывод о том, что увеличение числа

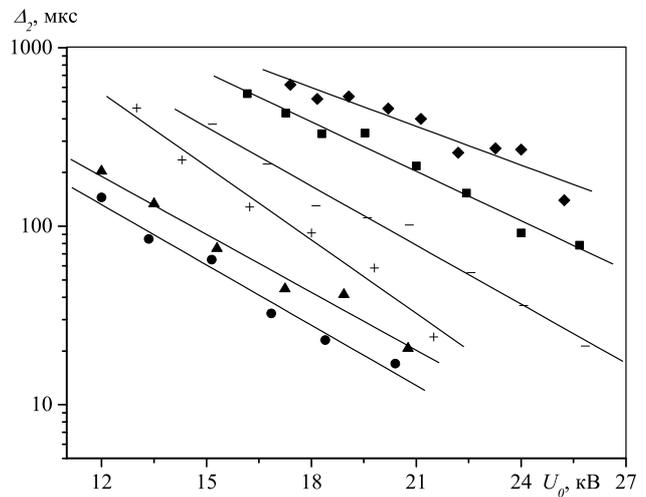


Рис. 4. Время распространения разряда при различном расположении преград. $L = 60$ мм, $H = 5$ мм, $R = 1$ кОм, $d = 2$ мм; ромбы — 5 преград, квадраты — 4 преграды, черточки — 3 преграды, кресты — 2 преграды, треугольники — 1 преграда, кружки — без преград

преград, затрудняющее распространение разряда, можно компенсировать увеличением начального напряжения. Такой же вывод можно сделать по результатам, представленным и на рис. 3, б. В-четвертых, из зависимостей рис. 4 следует, что при любых напряжениях в импульсе время распространения разряда падает с уменьшением числа преград, и в пределе оно стремится ко времени движения разряда над открытой водой.

Кроме того, из результатов, приведенных на рис. 4, видно, что графики зависимостей времени движения разряда от напряжения, построенные для разного числа преград, практически параллельны, из чего можно сделать вывод, что скорость распространения разряда зависит от начального напряжения одинаково для разного количества преград, включая

и случай, когда преград нет. На основании этого можно предположить, что механизм распространения разряда не зависит от наличия преград.

На рис. 5 приведены результаты, полученные для случая, когда вначале на пути разряда находились все преграды, но убирались они начиная с ближайшей к аноду.

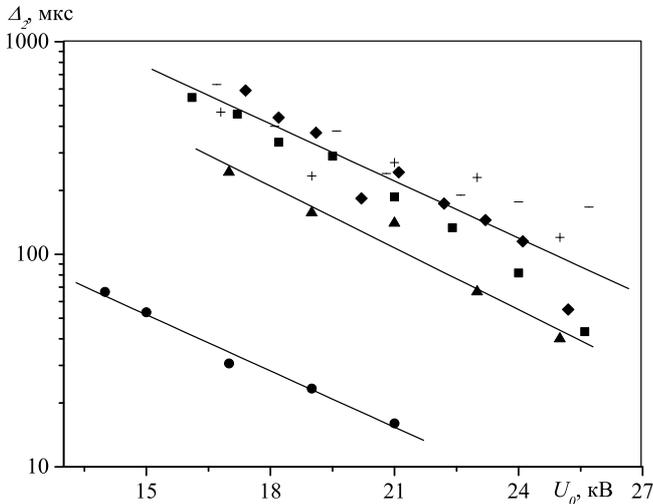


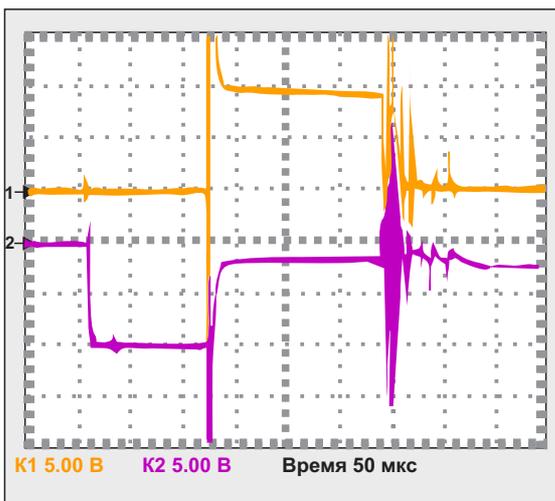
Рис. 5. Время распространения разряда при различном расположении преград. $L = 60$ мм, $H = 5$ мм, $R = 1$ кОм, $d = 2$ мм; ромбы — 5 преград, квадраты — 4 преграды, черточки — 3 преграды, кресты — 2 преграды, треугольники — 1 преграда, кружки — без преград

Из полученных зависимостей следует, что на время распространения разряда больше всего влияет первая преграда (ближайшая к катоду). Наличие же остальных преград оказывает меньшее влияние на дальнейшее протекание разряда, время его движения остается практически постоянным и не зависит

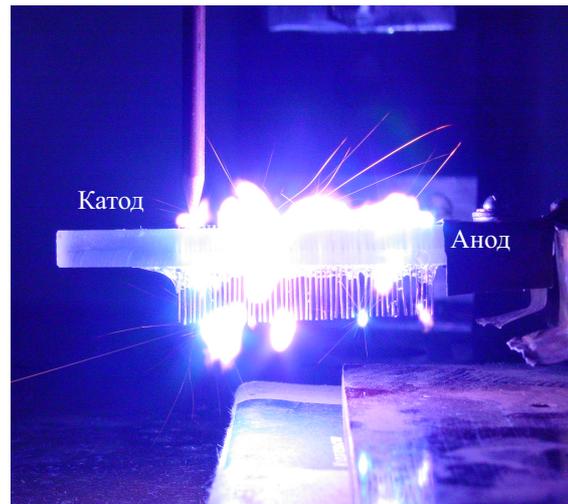
от числа преград. Таким образом, характер распространения разряда над водой в основном определяется первой преградой (ближайшей к острейшему катоду), влияние остальных преград, расположенных между первой и анодом, менее значительно.

Был проведен цикл экспериментов, в которых моделировалось распространение разряда при отсутствии водяного пара. В этом случае использовалась следующая конструкция. В пластинку из оргстекла толщиной 10 мм вставлялось 50 медных проволочек диаметром 0.5 мм таким образом, что расстояние между ними было также равно 0.5 мм. Нижние концы проволочек либо находились в воздухе, либо погружались в кювету с водой. В последнем случае вода являлась слабопроводящей средой. Напряжение подавалось между катодом, находящимся непосредственно над первой проволочкой, и анодом, имеющим прямой контакт с последней проволочкой.

Типичные осциллограммы тока и напряжения в разряде, полученные в случае, когда конструкция из проволочек полностью находилась в воздухе, представлены на рис. 6, а. По осциллограммам видно, что при подаче напряжения на электроды сначала некоторое время (для изображенной осциллограммы 120 мкс) разрядный ток отсутствует. Затем происходит резкое возрастание разрядного тока и падение напряжения на разряде. Осциллограммы такого вида характерны практически для всех экспериментов по изучению искрового пробоя. Момент резкого возрастания тока соответствует мгновенному (не разрешимому по времени при данной развертке) искровому пробое между катодом и ближайшей к нему проволочкой, затем происходит следующий пробой между соседними проволочками, и волна таких отдельных пробоев распространяется от катода к аноду со скоростью, характерной для искровых



а



б

Рис. 6. Конструкция из проволочек полностью находится в воздухе: а — осциллограммы тока (1) и напряжения (2) в разряде. $L = 50$ мм, $\tau = 300$ мкс, $H = 1$ мм, $U_0 = 22.5$ кВ, $R = 1$ кОм; б — фотография разряда. Цена большого деления по горизонтали 50 мкс/дел, по вертикали для тока 10 А/дел, для напряжения 10 кВ/дел

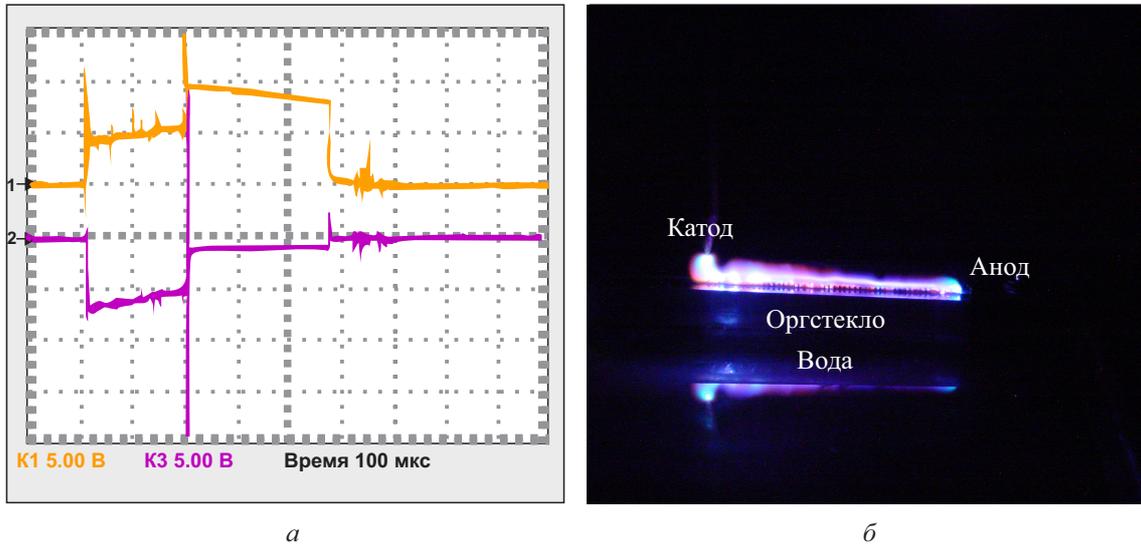


Рис. 7. Нижние концы проволочек погружены в кювету с водой: *a* — осциллограммы тока (1) и напряжения (2) в разряде. $L = 50$ мм, $\tau = 300$ мкс, $H = 1$ мм, $U_0 = 22.5$ кВ, $R = 1$ кОм; *б* — фотография разряда. Цена большого деления по горизонтали 50 мкс/дел, по вертикали для тока 10 А/дел, для напряжения 10 кВ/дел

пробоев $V \sim 10^6 - 10^7$ см/с. В результате волна пробоев практически моментально (по сравнению с длительностью импульса) достигает анода и формируется искровой плазменный канал, обладающий высокой проводимостью. Соответствующая интегральная фотография такого разряда представлена на рис. 6, б. После этого значения тока и напряжения остаются практически постоянными до конца импульса, что также характерно для искрового пробоя.

В экспериментах, когда нижние концы проволочек погружались в кювету с водой, характер распространения разряда существенно изменялся (рис. 7).

В этом случае на осциллограммах тока и напряжения практически отсутствует пауза тока, сразу же после подачи на электроды импульсного напряжения происходит линейный пробой между катодом и ближайшей проволочкой, расположенной под ним. Затем наблюдается медленный рост тока (рис. 7, *a*) и медленное падение напряжения на разряде, что характерно для стадии распространения разряда над поверхностью воды [3]. Как и в случае с водой, при достижении разрядом анода (завершенный разряд) образуется канал с большой проводимостью, что приводит к резкому возрастанию тока и соответствующему падению напряжения на разряде. Таким образом, в этом случае происходит именно движение разряда над поверхностью оргстекла с проволочками, что подтверждается и интегральной фотографией разряда (рис. 7, *б*), из которой видно, что разряд распространяется над проволочками.

Представляет определенный интерес сравнить зависимости времени распространения разряда от величины начального напряжения для разряда над поверхностью воды, для разряда над водой при наличии пяти преград и для разряда с металлическими проволочками, концы которых погружены в воду.

Результаты такого сравнения приведены на рис. 8. Из представленных зависимостей следует, что распространение разряда как при наличии преград, так и в случае его движения над металлическими проволочками, происходит за времена, которые на порядок и больше превышают величины, характерные для открытой воды. При этом для движения разряда требуются начальные напряжения в импульсе, превышающие величины, необходимые для реализации разряда над водой.

Отметим еще одну особенность полученных зависимостей. Как видно из рис. 8, графики, полученные для различных условий распространения разряда, практически параллельны. Таким образом, можно сделать вывод о том, что во всех трех случаях мед-

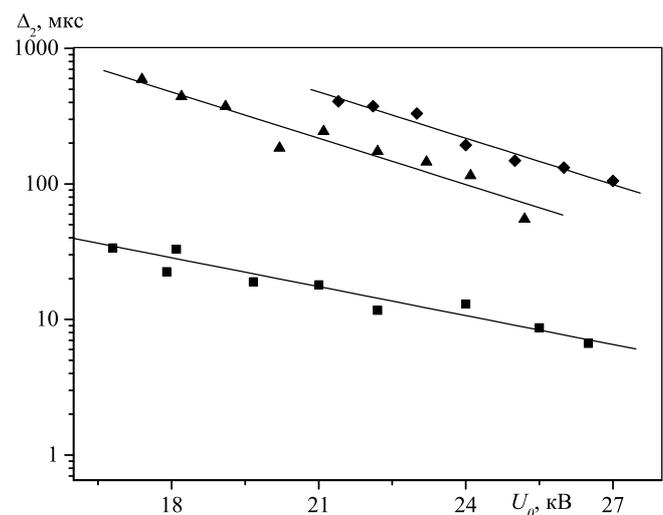


Рис. 8. Зависимость времени распространения разряда от величины начального напряжения: квадраты — обычная вода; треугольники — при наличии в воде пяти диэлектрических преград, диаметр преград $d = 2$ мм; ромбы — для металлических проволочек

ленное (по сравнению с волной пробоя) движение разряда можно объяснить одним и тем же механизмом его распространения. Этот вывод указывает, кроме того, на то, что наличие водной поверхности не является необходимым определяющим условием для распространения разряда. Следует указать, что распространение разряда над конструкцией с медными проволочками не может быть описано в рамках модели, предложенной в [19], ввиду отсутствия водяного пара.

Заключение

В целом на основании полученных результатов можно сделать предположение о том, что распространение импульсного разряда над поверхностями слабопроводящих сред имеет дискретный характер, при котором его развитие происходит в результате большого числа вторичных микропробоев между его головной частью и поверхностью слабопроводящей среды. При этом можно предположить, что шаг этой дискретности возрастает с увеличением начального напряжения в импульсе. Такое объяснение распространения разряда позволяет также объяснить результаты экспериментов с преградами. Действительно, для того чтобы разряд преодолел преграду, необходимо увеличить шаг дискретности, что возможно лишь при росте начального напряжения в импульсе, что и регистрируется в экспериментах.

Список литературы

1. Белошеев В.П. // ЖТФ. 1998. **68**, № 7. С. 44.
2. Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Копьев В.А., Косый И.А. // Физика плазмы 2006. **32**, № 11. С. 1048.
3. Александров А.Ф., Ваулин Д.Н., Ершов А.П., Черников В.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 1. С. 95. (Aleksandrov A.F., Vaulin D.N., Ershov A.P., Chernikov V.A. // Moscow University Phys. Bull. 2009. **64**, N 1. P. 100.)

4. Александров А.Ф., Ваулин Д.Н., Квас А.А., Черников В.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 2. С. 92. (Aleksandrov A.F., Vaulin D.N., Kvas A.A., Chernikov V.A. // Moscow University Phys. Bull. 2011. **66**, N 1. P. 83.)
5. Шмелев В.М., Марголин Л.Д. // ТВТ. 2003. **41**, № 4. С. 831.
6. Белошеев В.П. // ЖТФ. 1996. **66**, № 8. С. 50.
7. Белошеев В.П. // ЖТФ. 1998. **68**, № 11. С. 63.
8. Белошеев В.П. // ЖТФ. 2000. **70**, № 7. С. 109.
9. Шмелев В.М., Анпилов А.М., Бархударов Э.М. // Прикладная физика. 2005. № 5. С. 55.
10. Ваулин Д.Н., Квас А.А., Черников В.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 3. С. 56. (Vaulin D.N., Kvas A.A., Chernikov V.A. // Moscow University Phys. Bull. 2010. **65**, N 3. P. 214.)
11. Александров А.Ф., Ваулин Д.Н., Черников В.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 3. С. 62. (Aleksandrov A.F., Vaulin D.N., Chernikov V.A. // Moscow University Phys. Bull. 2010. **65**, N 3. P. 220.)
12. Ваулин Д.Н., Каменщиков С.А., Черников В.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 2. С. 88. (Vaulin D.N., Kamenshchikov S.A., Chernikov V.A. // Moscow University Phys. Bull. 2011. **66**, N 2. P. 196.)
13. Шмелев В.М., Евтюхов Н.В., Козлов Ю.Н., Бархударов Э.М. // Химическая физика. 2004. **23**, № 9. С. 77.
14. Белошеев В.П. // Устройство для обеззараживания питьевой источной воды. Патент РФ № 2042641. 1992.
15. Гайсин А.Ф., Кашапов Н.Ф. // Основные физико-химические процессы при плазменно-электролитной очистке поверхности. XXXI междунар. конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2006.
16. Пискарев И.М., Рылова А.Е., Севастьянов А.И. // Электрохимия. 1966. **32**, № 7. С. 895.
17. Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. // ЖТФ. 2007. **77**, № 8. С. 44.
18. Базелян Э.М., Хлапов А.В., Шкилев А.В. // Электричество. 1992. № 9. С. 19.
19. Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рухадзе А.А. // Физика плазмы. 2010. **36**, № 12. С. 1149.
20. Ваулин Д.Н., Ершов А.П., Каменщиков С.А., Черников В.А. // ТВТ. 2011. **49**, № 3. С. 365.

The propagation of a pulsed discharge above a liquid surface in the presence of barriers

A. F. Aleksandrov, V. L. Bychkov, D. N. Vaulin^a, V. A. Chernikov

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

E-mail: ^avauld@yandex.ru.

This paper is a continuation of a series of experiments that studied a pulsed discharge that propagates above a liquid surface [1–5]. A detailed study of the influence of a dielectric barrier on the nature of the propagation of a pulsed discharge above a water surface was conducted. It was shown that the presence of barriers leads to an increase in the initial voltage pulse that is required for discharge propagation. Along with this, a decisive role was played by the barrier that was nearest to the point of the electrode.

Keywords: pulse discharge, the surface of the liquid, dielectric barrier.

PACS: 52.75.Di.

Received 4 December 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2015).

Сведения об авторах

1. Александров Андрей Федорович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-25-74, e-mail: aleksandrov@phys.msu.ru.
2. Бычков Владимир Львович — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-38-85, e-mail: bychvl@gmail.com.
3. Ваулин Дмитрий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; e-mail: vauld@yandex.ru.
4. Черников Владимир Антонович — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 939-38-85, e-mail: vachernikov@rambler.ru.