

УДК 537.52

Распространение искрового канала в жидкости с микропузырьками

В. А. Панов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. Я. Печеркин, Э. Е. Сон

Экспериментально исследовано развитие искрового канала от игольчатого анода при импульсном электрическом пробое раствора изопропилового спирта в воде с микропузырьками воздуха. Наличие микропузырьков приводит к увеличению скорости распространения искрового канала и увеличению величины тока при замыкании разрядного промежутка. Наблюдаемая скорость распространения канала в жидкости с микропузырьками меняется от 4 до 12 м/с, что свидетельствует о тепловом механизме развития искрового канала в микропузырьковой жидкости.

PACS: 52.80.Wq

Ключевые слова: импульсный электрический разряд, искровой канал, жидкость, микропузырьки.

Введение

Детальные исследования физических процессов при пробое и ионизации воды начались в связи с интенсивным развитием мощной импульсной техники, когда было предложено использовать дистиллированную воду в импульсных накопителях энергии при импульсах напряжения мегавольтного диапазона [1]. С появлением современной наносекундной техники и скоростной фоторегистрации стало возможным более детально разобраться в процессах, происходящих на ранних, наиболее быстротекающих стадиях развития разряда [2, 3]. До настоящего времени достаточно подробно исследованы процессы развития разряда в однородных жидкостях с одиночными включениями других фаз [4]. Однако в настоящее время исследуется возможность эффективного применения импульсных электрических разрядов в газо-жидкостных средах в таких областях как, например, высоковольтное оборудование в энергетике [5], обеззараживание и дезинфекция водных растворов [6], очистка и химическое разложение вредных веществ [7]. Несмотря на обширный накопленный экспериментальный и теоретический материал, отсутствует физическая мо-

дель развития межэлектродного разрядного канала в водной среде. При этом в основном исследованы быстрые стадии развития разряда в воде в микро-секундном и наносекундном диапазонах времени [8, 9], который начинается с анода, а также процессы ионизации в отдельных пузырьках [10, 11]. Однако медленная тепловая стадия зарождения и развития искрового канала, а также влияние микропузырьков на развитие канала практически не исследовались.

Целью настоящей работы является исследование искрового разряда на стадиях инициации, распространения и горения искрового разряда в однородной жидкости и жидкости с микропузырьками воздуха на примере 15%-раствора изопропилового спирта в водопроводной воде с объемным содержанием микропузырьков соответственно 3 и 10 %.

Экспериментальная часть

Экспериментальная установка состоит из разрядного высоковольтного источника напряжения, генератора импульсного напряжения с ударной емкостью 0,8 мкФ и управляемого разрядника, разрядной ячейки, системы регистрации напряжения и тока с помощью осциллографа Tektronix DPO7054C и системы видеорегистрации на основе скоростной видеокамеры RedLake Motion Pro X3 с возможностью установки экспозиции кадров в диапазоне от 1 до 40 000 мкс. Сигналы тока и напряжения регистрировались с помощью безындуктивных токового шунта и делителя напряжения. Синхронизация электрических и видеосигналов осуществлялась с помощью генератора импульсов Г5-63. Длительность импульса напряжения составляла 5 мс по полувысоте с фронтом нараста-

Панов Владислав Александрович, младший научный сотрудник.

Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник.

Ветчинин Сергей Петрович, старший научный сотрудник.

Печеркин Владимир Яковлевич, старший научный сотрудник.

Сон Эдуард Евгеньевич, заместитель директора.

Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Тел. +7 (495) 484-18-10. E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2015 г.

© Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е., 2016

ния 0,2 мкс, амплитуда импульсного напряжения регулировалось в диапазоне 10—40 кВ. Разрядный ток ограничивался балластным сопротивлением до значения не более 10 А.

Разрядная ячейка состояла из кварцевой трубки с внутренним диаметром 16,6 мм, в которую помещались электроды. Анод выполнен из стальной шпильки, торец которой имеет форму конуса с высотой 5 мм и углом при вершине 20° , с радиусом скругления 50 мкм. Катод изготовлен из медной проволоки диаметром 2 мм. Рабочая область катода имеет форму ровной поверхности со скругленными по периметру окружности краями, которая расположена соосно с анодом. Ввод в жидкость микропузырьков воздуха со средним диаметром пузырьков 150 мкм осуществляется компрессором через микропористую пластину, расположенную в нижней части разрядной ячейки под катодом. Разрядная ячейка была заполнена раствором воды с 15%-содержанием изопропилового спирта. Объемная доля микропузырьков регулировалась давлением на микропористой пластине.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Были выполнены три серии экспериментов: в растворе воды с содержанием изопропилового спирта 15 % без пузырьков с удельным сопротивлением $\rho = 3,5$ кОм см, в таком же растворе с объемным содержанием микропузырьков 3 и 10 %. Развитие искрового разряда во всех случаях начинается с возникновения светящейся плазменной области вблизи анода (анодное пятно), затем плазменный канал прорастает в сторону катода. Анодное пятно возникает с большой задержкой (около 500 мкс) после появления напряжения на аноде. Такие большие времена задержки связаны с развитием тепловой неустойчивости в прианодной области, по-видимому, вследствие сильного колебательного возбуждения молекул при нагреве жидкости и пара в результате тепловыделения в анодной области [4]. При наличии микропузырьков вначале наблюдается их свечение вблизи анода, затем граница области свечения микропузырьков сдвигается в сторону катода. Канал разряда прорастает последовательно по ярко светящимся

микропузырькам до полного замыкания разрядного промежутка. Фотография разрядного промежутка с микропузырьками приведена на рис. 1, экспозиция кадра 200 мкс. Микропузырьки в жидкости, которые видны на рис. 1, подсвечиваются излучением канала разряда.

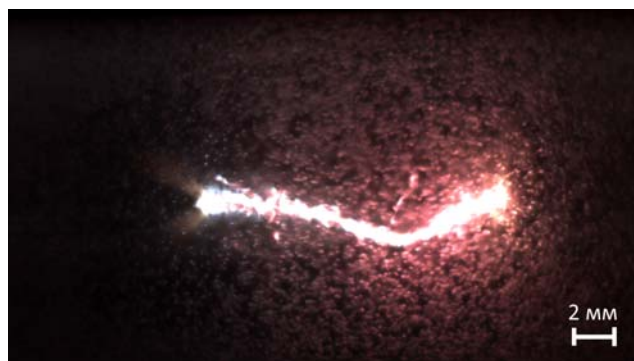


Рис. 1. Фотография искрового канала в момент замыкания разрядного промежутка с объемным содержанием микропузырьков 3 % (анод с левой стороны, катод — с правой). Экспозиция кадра — 200 мкс, скорость съемки — 1040 кадров/с. Амплитуда напряжения на разрядной ячейке в момент экспозиции кадра $U = 0,7$ кВ, ток $I = 1,5$ А, время после подачи импульса напряжения $t = 5450$ мкс. Межеlectродное расстояние 15 мм.

Осциллограммы импульсов напряжения и тока при развитии разряда в жидкости без пузырьков и с микропузырьками представлены на рис. 2 и 3. Величина пробойного напряжения определялась как максимальное напряжение на разрядном промежутке, которое обеспечивало замыкание тока в разрядном промежутке. Наличие микропузырьков приводит к незначительному уменьшению напряжения пробоя при содержании микропузырьков в жидкости 3 % и к увеличению напряжения пробоя почти на 35 % при объемном содержании микропузырьков 10 %. Напряжение на разрядном промежутке в момент его замыкания почти в два раза выше при содержании микропузырьков 10 % по сравнению жидкостью без пузырьков или с содержанием микропузырьков 3 %. После замыкания разрядного промежутка формируется дуговой канал с падающей вольт-амперной характеристикой. Свечение дугового канала наблюдается в течение почти 5 мс.

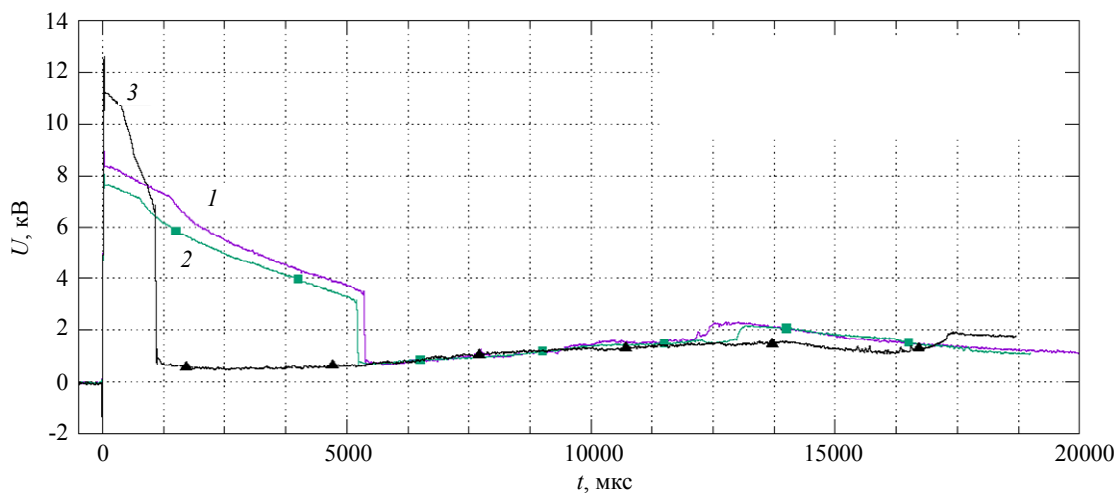


Рис. 2. Осциллограммы напряжения U при разряде. Кривая 1 — без микропузырьков; кривая 2 — объемное содержание микропузырьков 3 %; кривая 3 — объемное содержание микропузырьков 10 %.

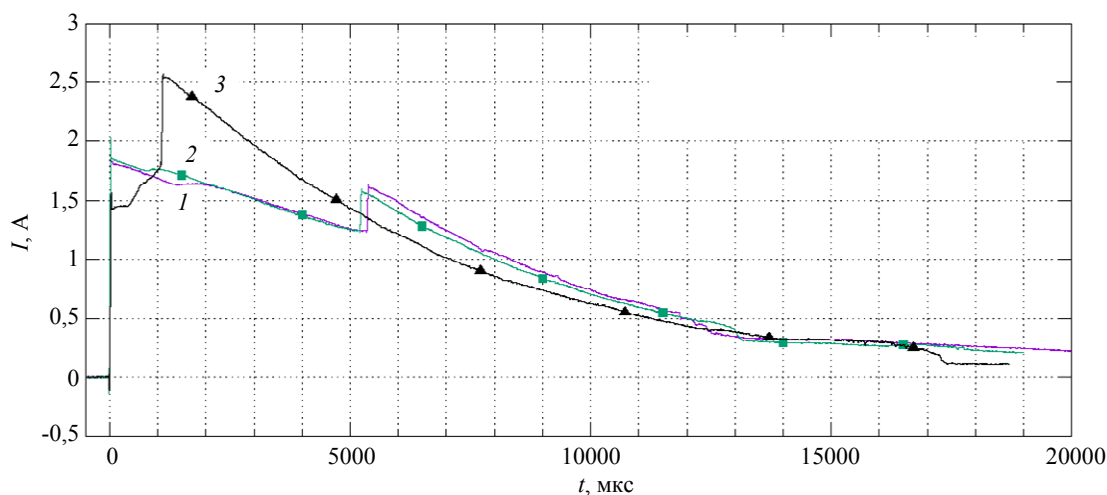


Рис. 3. Осциллограммы разрядного тока I . Кривая 1 — без микропузырьков; кривая 2 — объемное содержание микропузырьков 3 %; кривая 3 — объемное содержание микропузырьков 10 %.

На рис. 3 видно, что в момент подачи напряжения на разрядный промежуток наблюдается начальный ток проводимости, поскольку жидкость обладает омическим сопротивлением. При напряжении U на разрядном промежутке, приближающемся к напряжению пробоя зависимость тока от напряжения отклоняется от линейной. При дальнейшем увеличении напряжения вблизи анода наблюдается отрицательное дифференциальное сопротивление ($dU/dI < 0$), что свидетельствует о развитии тепловой неустойчивости и ионизации, аналогично тому, как это наблюдается при пробое влажного песка [12, 13]. Перегревная неустойчивость приводит к контракции тока вблизи острия анода и образованию анодного пятна. В момент загорания анодного пятна к току проводимости добавляется ток ионизации, связанный с возникновением анодного пятна, что приводит к тому, что общий ток в разрядной цепи уменьшается (при-

мерно на 10 %) из-за падения напряжения на балластном сопротивлении. Покадровый анализ скоростной видеосъемки (12000 кадров/с) показывает, что характерное время развития перегревной неустойчивости, приводящей к ионизации вблизи анода, составляет 80—160 мкс. При дальнейшем прорастании ионизованного светящегося канала в жидкости без пузырьков и с содержанием пузырьков 3 % ток также, как и напряжение уменьшается. В жидкости с содержанием пузырьков 10 %, в отличие от предыдущих случаев, наблюдается рост тока вплоть до момента замыкания промежутка каналом разряда. В момент замыкания промежутка плазменным каналом происходит скачкообразное возрастание тока более чем на 30 % и образование катодного пятна, которое сопровождается ярким свечением. Катодное свечение намного ярче, чем анодное и наблюдается в течение 12 мс. При замыкании канала общее сопротивление цепи

падает, примерно, в пять раз в жидкости с содержанием пузырьков 3 % и примерно в восемь раз в жидкости с содержанием пузырьков 10 %. Из результатов скоростной фоторегистрации установлено, что гидродинамический распад дугового канала наблюдается на десятой миллисекунде для жидкости с содержанием пузырьков 3 % и на шестнадцатой миллисекунде для жидкости с содержанием пузырьков 10 %.

Время задержки пробоя после подачи напряжения при содержании микропузырьков 10 % составляет 1,2 мс, в отличие от более длительного времени задержки в жидкости без пузырьков и с содержанием микропузырьков 3 %, которое равно ~ 5 мс.

Обсуждение результатов

Наличие существенной начальной проводимости в жидкости, состоящей из воды с содержанием изопропилового спирта 15 %, определяет механизм развития импульсного пробоя с острейшего анода. В отличие от диэлектрических неполярных жидкостей или дистиллированной воды, в которых при микросекундных импульсах напряжения развивается стримерный пробой [2, 3], в проводящей жидкости пробой с анода развивается по тепловому механизму при подаче миллисекундных импульсов и при меньших амплитудах напряжения. Последнее связано с большой плотностью тока проводимости с острейшего анода, на котором происходит усиление электрического поля. Ток проводимости разогревает жидкость, что приводит к ее быстрому испарению вблизи анода и нагреву до температур 4000—5000 К, при которых уже происходит термическая ионизация газовой среды и развитие перегретой неустойчивости [14]. Наиболее наглядно это видно на динамической ВАХ разряда в жидкости, когда появляется область с отрицательным дифференциальным сопротивлением ($dU/dI < 0$) [13]. Чтобы перегретая неустойчивость вызвала ионизацию среды вблизи анода, необходимо, чтобы выделение энергии проходящим током было достаточно для термической ионизации, вызванной джоулевым нагревом жидкости. Напряженность электрического поля вблизи острейшего анода можно оценить по формуле из работы [15]

$$E_a = 2U/(\epsilon r_a \ln(4L/r_a))$$

где $\epsilon = 80$ — относительная диэлектрическая проницаемость воды, r_a — радиус кривизны острейшего анода, L — длина межэлектродного промежутка. В нашем случае оценки показывают, что

при $U = 10$ кВ и $r_a = 50$ мкм напряженность электрического поля E_a достигает значений $\sim 10^5$ В/см. При плотности тока на острейшем аноде $j_a \sim 10^4$ А/см² плотность энерговыделения в анодной области за время развития перегретой неустойчивости $\tau \sim 100$ мкс составляет значительную величину $\tau j_a E_a \sim 10^5$ Дж/см³. Этой энергии вполне хватает для разогрева испарившейся жидкости до 5000 К в объеме порядка $\sim 10 r_a^3$.

Скорость прорастания канала в жидкости и при малой концентрации микропузырьков составляет 4 м/с, что явно указывает на тепловой механизм развития плазменного канала. Добавление большего количества микропузырьков в жидкость увеличивает скорость прорастания канала в три раза, что связано с дополнительной ионизацией газа в микропузырьках, встречающихся на пути канала. В конечной стадии тепловой пробой происходит по газовому каналу, который образуется при испарении и ионизации за счет местного нагрева канала токами проводимости.

Заключение

Проведенные исследования показали, что пробой проводящей жидкости с острейшего анода миллисекундными импульсами напряжения с амплитудой 10—20 кВ с крутым фронтом развивается по тепловому механизму. Наличие большого количества микропузырьков в проводящей жидкости приводит к увеличению скорости прорастания плазменного канала разряда в несколько раз, что связано с ионизацией газа в микропузырьках на пути распространения канала.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 14-50-00124.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. — М.: Мир, 1984.
2. Ушаков В. Я., Клишкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. — Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
3. Торшин Ю. В. Физические процессы формирования электрического пробоя конденсированных диэлектриков: Для внутренней изоляции аппаратов высокого, сверх- и ультравысокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 2008.
4. Акишев Ю. С., Грушин М. Е., Каральник В. Б., Моноч А. Е., Панькин М. В., Трушкин Н. И., Холоденко В. П., Чугунов В. А., Жиркова Н. А., Ирхина И. А., Кобзев Е. Н. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 1142.
5. Фортон В. Е., Сон Э. Е., Исакаев М.-Э. Х., Карпухин А. В., Леонов А. А., Спектор Н. О., Юсупов Д. И. Способ

защиты маслонаполненного трансформатора от взрыва и маслонаполненный трансформатор с защитой от взрыва. Патент № 2516307 от 07.03.2012 г.

6. Панов В. А., Куликов Ю. М., Сон Э. Е. Многопиновая ячейка для плазмохимической очистки загрязненной жидкости. Патент № 134921 от 16.04.2013 г.

7. Горячев В. Л., Рутберг Ф. Г., Федюкович В. Н. // Известия Академии наук. Энергетика. 1998. № 1. С. 40.

8. Starikovskiy A., Yang Y., Cho Y. I., Fridman A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2011. Vol. 20. P. 024003.

9. Marinov I., Guaitella O., Rousseau A., Starikovskaia S. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2013. Vol. 22. P. 042001.

10. Коробейников С. М., Мелехов А. В., Бесов А. С. // ТВТ. 2002. Т. 40. № 5. С. 706.

11. Babaeva N. Yu., Tereshonok D. V., Naidis G. V. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48. No. 35. P. 355201.

12. Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Панов В. А., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 825.

13. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Efimov B. V., Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N., Ivonin V. V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. Vol. 48. P. 285201.

14. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Искровой разряд. — М.: Изд-во МФТИ. 1997.

15. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. — М.: Наука, 1971.

Spark channel propagation in a microbubble liquid

V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia

E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Received December 24, 2015

Experimental study on the development of the spark channel from the anode needle under pulsed electrical breakdown solution of isopropyl alcohol in water with air microbubbles has been performed. The presence of the microbubbles increases the velocity of the spark channel propagation and increases the current in the discharge gap circuit. The observed rate of spark channel propagation in microbubble liquid ranges from 4 to 12 m/s, indicating the thermal mechanism of the spark channel development in a microbubble liquid.

PACS: 52.80.Wq

Keywords: pulsed electrical discharge, spark channel, liquid, microbubbles.

REFERENCES

1. R. B. Miller, *Introduction to Physics of Intense Charged Particle Beams* (ISBN 978-1-4684-1128-7, 1982; Mir, Moscow, 1984).
2. V. Ya. Ushakov, V. F. Klimkin, S. M. Korobeinikov, and V. V. Lopatin, *Breakdown of Liquids at pulse Voltage* (NTL, Tomsk, 2005) [in Russian].
3. Yu. V. Torshin, *Physical Processes of Forming the Electrical Breakdown in Condensed Dielectrics* (Energoatomizdat, Moscow, 2008) [in Russian].
4. Yu. S. Akishev, M. E. Grushev, V. B. Karal'nik, A. E. Monich, M. V. Pan'kin, N. I. Trushkin, V. P. Kholodenko, V. A. Chugunov, N. A. Zhirkova, I. A. Irkhina, and E. N. Kobzev, *Plasma Phys. Rep.* **32**, 1052 (2006).
5. V. E. Fortov, E. E. Son, M.–E. Kh. Isakaev, A. V. Karpukhin, A. A. Leonov, N. O. Spektor, and D. I. Yusupov, RF Patent No. 2516307, March 7, 2012.
6. V. A. Panov, Yu. M. Kulikov, and E. E. Son, RF Patent No. 134921, April 16, 2013.
7. V. L. Goryachev, F. G. Rutberg, and V. N. Fedyukovich, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Energetics*, No. 1, 40 (1998).
8. A. Starikovskiy, Y. Yang, Y. I. Cho, and A. Fridman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **20**, 024003 (2011).
9. I. Marinov, O. Guaitella, A. Rousseau, and S. M. Starikovskaia, *Plasma Sources Sci. Technol.* **22**, 042001 (2013).
10. S. M. Korobeinikov, A. V. Melekhov, and A. S. Besov, *High Temperature* **40**, 652 (2002).
11. N. Yu. Babaeva, D. V. Tereshonok, and G. V. Naidis, *Journal of Physics D: Applied Physics* **48**, 355201 (2015).
12. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, *High Temperature* **52**, 797 (2014).
13. L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, E. E. Son, B. V. Efimov, A. N. Danilin, V. V. Kolobov, V. N. Selivanov, and V. V. Ivonin, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 285201 (2015).
14. E. M. Bazelyan and Yu. P. Raiser, *Spark Discharge* (MFTI, Moscow, 1997) [in Russian].
15. K. A. Naugol'nykh and N. A. Roi, *Electrical Discharges in Water* (Nauka, Moscow, 1971) [in Russian].