

**Влияние распределенной фазы газовых пузырьков  
на импульсный электрический разряд в воде***В. А. Панов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. Я. Печеркин, А. С. Савельев*

*Экспериментально исследовано развитие импульсного электрического разряда в воде с паровоздушными микропузырьками, распределение которых в объеме жидкости близко к равномерному. Наличие объемных микропузырьков со средним диаметром  $\sim 50$  мкм при объемном газосодержании не более 1 % не меняет механизм развития электрического разряда в воде с проводимостью  $\sim 300$  мкСм/см в диапазоне перенапряжений 1–1,5 при значении минимального пробойного напряжения  $\sim 9$  кВ на разрядном промежутке 1 см, причем механизм остаётся тепловым. При указанных условиях определяющую роль играют поверхностные пузырьки, которые приводят к смене наблюдаемого механизма развития разряда. Инициация происходит одновременно на обоих электродах в поверхностных пузырьках, к замыканию промежутка длиной 1 см приводит рост катодного канала со скоростью  $\sim 60$  м/с за время  $\sim 160$  мкс.*

*Ключевые слова:* импульсный электрический разряд, микропузырьки, пробой, вода.

**Введение**

В мировой литературе неоднократно отмечалась важность исследования развития электрического разряда в жидкостях и, в частности, в воде в связи с развитием перспективных плазменных методов очистки водных растворов или подготовки водной среды [1, 2].

Моделирование развития разряда в пузырьках [3–6] и в небольших их группах [7], помещенных в жидкость, показывает, что пробой таких пузырьков зависит, в основном, от величины напряженности поля, размеров пузырьков (точнее, от величины  $pR$ , где  $p$  – давление внутри пузырька,  $R$  – радиус пузырька [5]), диэлектрической проницаемости жидкости. Влияние размера объясняется наличием критической длины лавинно-стримерного перехода, а диэлектрическая прони-

цаемость жидкости определяет распределение электрического поля внутри пузырька, которое, в свою очередь, определяет траекторию стримера при пробое пузырька [4], т. е. диаметральной или вдоль поверхности. Экспериментальные результаты исследований пробоя отдельных пузырьков [8, 9] в целом не противоречат этим выводам.

Методы, развиваемые для численного моделирования развития разряда в жидкости в присутствии пузырьков, опираются на кинетический расчет концентраций внутри каждого пузырька и не подходят для моделирования развития разряда за разумное время в микропузырьковой среде, в которой пузырьки распределены в объеме жидкости с некоторой значительной конечной концентрацией. Отметим, что здесь учёт всех «коллективных» эффектов становится затруднительным. Тем не менее, развитие пробоя в каком-то одном пузырьке еще не гарантирует замыкания разрядного промежутка. Поэтому для решения задачи пробоя микропузырьковой среды экспериментальные исследования в настоящий момент остаются пока наиболее информативными.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование развития импульсного электрического разряда в воде с паровоздушными микропузырьками, распределение которых в объеме жидкости близко к равномерному. При этом была проведена серия экспериментов, в которой исследовались две «конфигурации» газовых пузырьков в воде:

1. микропузырьки (средний диаметр  $d_{10} \approx 40$ – $60$  мкм) в межэлектродном объеме и крупные

**Панов Владислав Александрович**, научный сотрудник.  
**Василяк Леонид Михайлович**, главный научный сотрудник,  
д.ф.-м.н.

**Ветчинин Сергей Петрович**, старший научный сотрудник,  
к.ф.-м.н.

**Печеркин Владимир Яковлевич**, старший научный  
сотрудник, к.ф.-м.н.

**Савельев Андрей Сергеевич**, заведующий лабораторией,  
к.ф.-м.н.

Объединенный институт высоких температур РАН.

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

Тел. 8 (495) 484-18-10. E-mail: panovvladislav@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 14 сентября 2017 г.*

пузырьки (~ 400 мкм) на поверхности обоих электродов;

2. микропузырьки в межэлектродном объёме и «чистые» электроды (без видимых пузырьков, т. е. диаметр пузырьков менее ~ 15 мкм).

### Экспериментальная установка и методика измерений

Микропузырьки в объёме воды получались методом декомпрессии (при атмосферном давлении) после длительного растворения в воде воздуха под давлением 7 атм в барботажной колонне в течение часа. После этого через узкое сопло вода под тем же давлением подавалась в разрядную камеру, открытую в атмосферу, в которой и происходило образование микропузырьков во всем объёме.

Контроль размеров пузырьков осуществлялся по теневым изображениям, после статистической обработки которых строилось распределение микропузырьков по диаметрам. Максимум распределения приходится на диапазон 45–60 мкм. Распределение обладает хорошей повторяемостью при соблюдении одинаковых давления газа, положения сопла при декомпрессии и прочих параметров. Из-за быстрого падения оптической прозрачности микропузырьковой среды с повышением объёмного газосодержания применяемый теневой метод диагностики позволял работать в диапазоне  $\varphi < 1,5\%$ .

При декомпрессии в разрядной камере образуются микропузырьки в воде, а на электродах в отсутствие специальных мер формируются крупные пузырьки. Таким способом получается одна из исследуемых «конфигураций». Для исследования конфигурации с «чистыми» электродами на время газации электроды закрываются защитным материалом, который удаляется, примерно, за 5 с до включения импульса напряжения.

Для генерации одиночных импульсов напряжения использовался генератор импульсного напряжения с диапазоном амплитуды импульса выходного напряжения до 30 кВ и ударной ёмкостью 0,77 мкФ. Длительность импульса на высоте составляла ~3 мс. Импульс напряжения на разрядной ячейке коммутировался при помощи управляемого газового разрядника. Ток в цепи разрядного промежутка ограничивался балластным сопротивлением  $R_6 = 5,5$  кОм. Для регистрации высокого напряжения на высоковольтном электроде параллельно разрядному промежутку включен резистивный делитель напряжения, для регистрации тока через промежуток после высоковольтного электрода в цепь включено измерительное сопротивление  $R_{ш} = 2,15$  Ом. Сигналы с рези-

стивного делителя и токового шунта подавались на запоминающий цифровой осциллограф LeCroy HDO4054. Для регистрации сигнала с делителя применялся дополнительный пассивный пробник напряжения Tektronix P6015A.

Визуализация разрядных процессов в межэлектродном промежутке проводилась теневым методом с постоянной подсветкой. Запись изображений велась фотокамерой Phantom v2012 с частотой 130000 кадров/с. Вследствие сильного рассеяния света водой с микропузырьками время экспозиции кадров выбиралось близким к максимально доступному при заданной частоте съёмки. В результате для указанной выше частоты оно составляло ~5,9 мкс.

Синхронизация моментов начала фоторегистрации и осциллографирования с моментом подачи высоковольтного импульса на высоковольтном электроде обеспечивалась генератором импульсов/задержек Berkeley Nucleonics BNC575.

Разрядная ячейка изготовлена из органического стекла и имеет форму параллелепипеда шириной 8 см, глубиной (по линии зрения фотокамеры) 3 см и высотой 15 см. Электроды выполнены из вольфрамовых стержней диаметром 1,6 мм и установлены соосно, горизонтально, на уровне 5 см от днища ячейки вдоль длинной стороны. Рабочий конец анода имеет коническую форму (полный угол ~ 30°) со скругленным на радиус 200 мкм кончиком. Катод имеет плоский рабочий торец со скругленной кромкой. Контакт с жидкостью имеют последние 4 мм каждого электрода. Межэлектродное расстояние зафиксировано и всегда равно 1 см.

### Результаты и обсуждение

Исследования влияния микропузырьков на пробой в водопроводной воде с проводимостью  $\sigma \approx 300$  мкСм/см проводились при напряжениях, близких к минимальному пробойному для воды без пузырьков  $U_m \approx 9$  кВ, а также при перенапряжении до  $1,5U_m$ .

На рис. 1 представлены теневые фотографии развития разряда в водопроводной воде с микропузырьками в объёме и «чистыми» электродами при перенапряжении 1,5. В указанном диапазоне напряжений механизм пробоя и развития разряда не отличался от наблюдаемого ранее в водных растворах той же проводимости [10, 11] и влажных грунтах [12], т. е. реализовался тепловой механизм пробоя. При величине перенапряжения 1,5 время роста начальной парогазовой области до критического размера, при котором происходит её пробой, составило ~ 40 мкс, время распростране-

ния канала разряда из начальной области составило  $\sim 1,2$  мс, что совпадает с полученными нами ранее при других условиях. Средняя скорость канала составила  $\sim 8$  м/с. Энергия, вложенная к моменту инициации разряда (пробоя начальной парогазовой), составила  $\sim 1,5$  Дж, а к моменту замыкания промежутка каналом разряда – 30 Дж.

Было обнаружено, что на инициацию и развитие пробоя в проводящей воде в большей степени влияют пузырьки на поверхности электродов (см. рис. 2). В изначально покоящихся до подачи

напряжения пузырьках в течение первых 8 мкс происходит пробой (рис. 2, а, яркие точки в центрах крупных катодных пузырьков – изображения источника подсветки). При этом пробой анодных пузырьков выглядит как возникновение светящейся «перемычки» между поверхностями электрода и пузырька, проходящей практически по диаметру, а в катодных пузырьках возникает, скорее, равномерная засветка. В последующие  $\sim 10$  мкс в отдельных пузырьках равномерная засветка также трансформируется в «перемычку» (рис. 2, б).

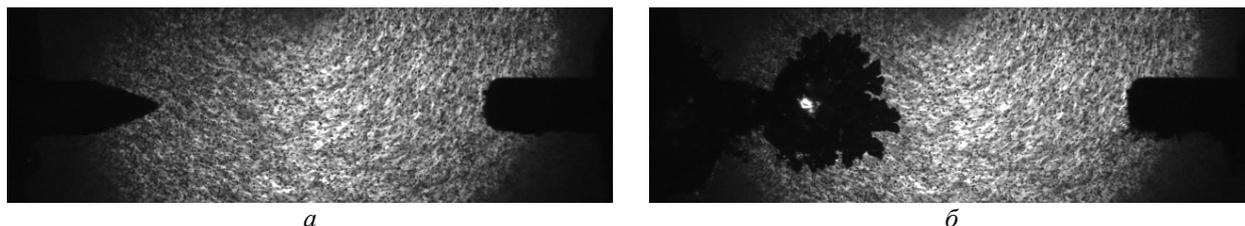


Рис. 1. Теневые фотографии развития электрического разряда в водопроводной воде с микропузырьками при перенапряжении 1,5: а) – до подачи импульса напряжения; б) – через 315 мкс после начала импульса. Анод – слева, катод – справа. Равномерная зернистость на светлом фоне между электродами – распределенные микропузырьки.

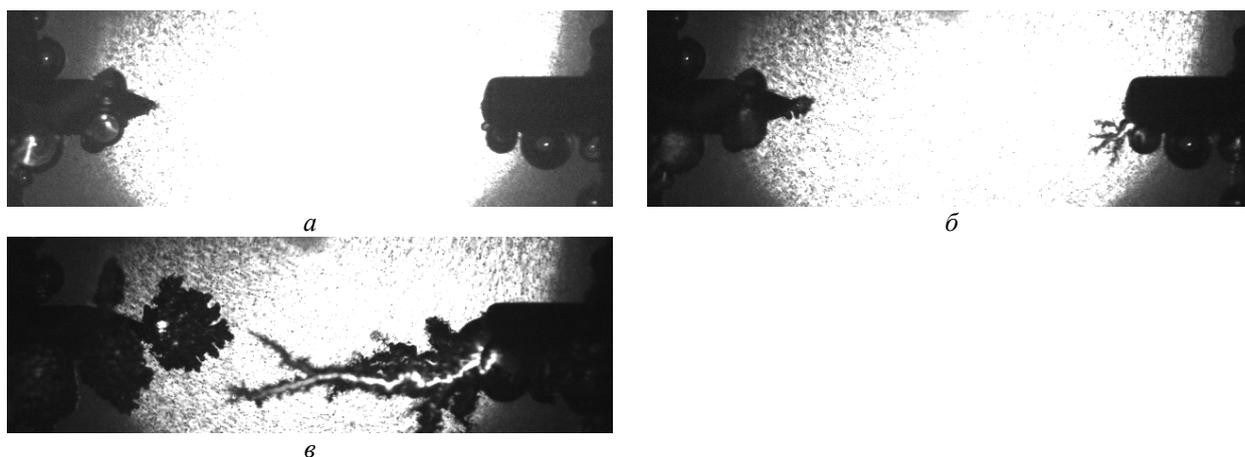


Рис. 2. Развитие электрического разряда в водопроводной воде с микропузырьками и пузырьками на поверхности обоих электродов, перенапряжение 1,5. Задержка фото: а) 7 мкс; б) 20 мкс; в) 138 мкс. Яркость изображений а) увеличена относительно изображения б) искусственно (в стандартной программе управления фотокамерой Phantom Camera Control Software, версия 2.7) с целью сделать видимыми процессы в поверхностных пузырьках, обладающих слабым собственным свечением.

Несмотря на пробой существующих на аноде пузырьков, вблизи острия в это же время формируется начальная паровая область. Фактически развитие разрядных каналов происходит сразу из нескольких ионизованных пузырьков, включая начальную паровую область.

Инициация разрядного канала на катоде происходит из пузырька диаметром  $\sim 150$  мкм, расположенного в области наибольшей напряженности электрического поля к десятой микросекунде. К этому моменту его длина достигает  $\sim 1$  мм, а вложенная энергия – на уровне десятых долей Дж.

Полная энергия к моменту замыкания составила  $\sim 5$  Дж, что значительно меньше энергии, требуемой для пробоя с анода, и выглядит логичным, если в момент перед замыканием сравнить объемы, занимаемые катодным каналом и каналом с анода в случае «обычного» теплового пробоя.

После практически одновременной инициации каналов на аноде и катоде начинается их встречное движение со средними скоростями около 15 и 60 м/с соответственно. Замыкание промежутка происходит преимущественно катодным каналом вследствие более высокой скорости (см. рис. 2, б).

### Заключение

Наличие объёмных микропузырьков со средним диаметром  $\sim 50$  мкм при объёмном газо-содержании не более 1 % не меняет механизм развития электрического разряда в воде с проводимостью  $\sim 300$  мкСм/см в диапазоне перенапряжений 1–1,5 при значении минимального пробойного напряжения  $\sim 9$  кВ в разрядном промежутке длиной 1 см с острым анодом и плоским катодом.

Было обнаружено, что на инициацию и развитие пробоя в проводящей воде в большей степени влияют пузырьки на поверхности электродов. Наличие поверхностных пузырьков приводит к смене наблюдаемого механизма развития разряда. Инициация происходит одновременно на обоих электродах. На аноде она связана как с пробоем поверхностных пузырьков, из которых впоследствии развиваются боковые каналы, так и с ростом парогазового пузырька у острия и его дальнейшей ионизацией, наблюдавшимся ранее при исследовании пробоя водопроводной воды без пузырьков. На катоде инициация и дальнейшее развитие канала происходят при пробое поверхностных пузырьков, находящихся в области максимальной напряженности поля. После инициации каналов происходит их встречное движение, однако скорость канала с катода ( $\sim 60$  м/с) значительно превышает скорость анодного канала ( $\sim 15$  м/с), поэтому перекрытие промежутка происходит, в основном, катодным каналом. Общее время пробоя сокращается с нескольких миллисекунд до нескольких сотен микросекунд.

Следует отметить, что наблюдаемый своеобразный «эффект полярности» при инициации пробоя на обоих электродах, выражающийся в предпочтительном развитии разряда с плоского

катода, а не с острейшего анода, и значительно большей скорости распространения канала, еще предстоит исследовать более подробно и найти ему объяснение.

*Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант № 16-08-00088.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bruggeman P., Leys C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. No. 5. P. 053001.
2. Foster J. E. // Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24. No. 5. P. 055501.
3. Babaeva N. Y., Kushner M. J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36. No. 4. P. 892.
4. Babaeva N. Yu., Kushner M. J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. No. 13. P. 132003.
5. Babaeva N. Yu., Tereshonok D. V., Naidis G. V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. Vol. 48. No. 35. P. 355201.
6. Babaeva N. Yu., Naidis G. V., Tereshonok D. V., Smirnov B. M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. Vol. 50. No. 36. P. 364001.
7. Babaeva N. Yu., Naidis G. V., Tereshonok D. V., Smirnov B. M. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 774. No. 1. P. 012151.
8. Gershman S., Belkind A. // Eur. Phys. J. D. 2010. Vol. 60. No. 3. P. 661.
9. Hamdan A., Cha M. S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44. No. 12. P. 2988.
10. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. No. 38. P. 385202.
11. Panov V. A., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Kulikov Yu. M., Son E. E. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 653. P. 012157.
12. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Panov V. A., Pecherkin V. Ya., Son E. E. // Plasma Phys. Rep. 2016. Vol. 42. No. 3. P. 301.

PACS: 52.80.Wq

## Influence of a distributed phase of gas bubbles on the pulsed electrical discharge in water

*V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and A. S. Saveliev*

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
Bld 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia

*Received September 14, 2017*

***The development of pulsed electrical discharge in water with vapor-air microbubbles has been studied experimentally with bubbles volume distribution in water close to uniform. The presence of volumetric microbubbles with an average diameter of  $\sim 50$   $\mu\text{m}$  with a bulk gas content of not more than 1 % did not change the thermal mechanism of the development of the discharge in water with a conductivity of***

*~ 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  in the overvoltage range of 1–1.5 with a minimum breakdown voltage of ~ 9 kV. Under these conditions, the determining role is played by surface bubbles, which lead to a change in the observed mechanism of discharge development. Initiation occurred simultaneously on both electrodes in surface bubbles, the cathode channel growth at a velocity of ~ 60 m/s during a time of ~ 160  $\mu\text{s}$  and leads to the closure of 1 cm gap.*

*Keywords:* pulsed electrical discharge, microbubbles, breakdown, water.

#### REFERENCES

1. P. Bruggeman and C. Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (5), 053001 (2009).
2. J. E. Foster, *Phys. Plasmas* **24** (5), 055501 (2017).
3. N. Y. Babaeva and M. J. Kushner, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** (4), 892 (2008).
4. N. Yu. Babaeva and M. J. Kushner, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (13), 132003 (2009).
5. N. Yu. Babaeva, D. V. Tereshonok and G. V. Naidis, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** (35), 355201 (2015).
6. N. Yu. Babaeva, G. V. Naidis, D. V. Tereshonok and B. M. Smirnov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** (36), 364001 (2017).
7. N. Yu. Babaeva, G. V. Naidis, D. V. Tereshonok and B. M. Smirnov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **774** (1), 012151 (2016).
8. S. Gershman and A. Belkind, *Eur. Phys. J. D.* **60** (3), 661 (2010).
9. A. Hamdan and M. S. Cha, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44** (12), 2988 (2016).
10. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin and E. E. Son, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** (38), 385202 (2016).
11. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, Yu. M. Kulikov and E. E. Son, *J. Phys.: Conf. Ser.* **653**, 012157 (2015).
12. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin and E. E. Son, *Plasma Phys. Rep.* **42** (3), 301 (2016).