

Влияние полярности электродов на развитие пробоя в проводящей воде с микропузырьками воздуха*В. А. Панов, В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин*

Экспериментально исследовано влияние полярности электродов с геометрией «острие–штырь» на развитие импульсного электрического разряда в воде с удельной электропроводностью (90 ± 10) мкСм/см с воздушными микропузырьками и без них. Обнаружено, что начальная инициация плазменного канала на аноде в воде происходит вблизи контакта металл–жидкость–изоляция для всех исследуемых геометрий анода. В присутствии пузырьков при повышенном напряжении развитие плазменных каналов после инициации происходит в противоположную от разрядного промежутка сторону вдоль изолированной поверхности электродов. При наличии пузырьков снижается амплитуда напряжения пробоя, уменьшается время задержки иницирования и общее время развития пробоя каналом, развивающимся с острейшего анода. При повышении амплитуды напряжения развитие замыкающего канала происходит с катода вне зависимости от его геометрии.

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

Ссылка: Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 5.

Reference: V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, and S. P. Vetchinin, Applied Physics, No. 6, 5 (2020) [in Russian].

Введение

Рост объёмов мирового промышленного потребления воды год от года повышает экологическую нагрузку на окружающую среду. Большой объем сточных вод попадает обратно без обработки и очистки, что неизбежно приводит к дефициту питьевой воды и росту заболеваемости при её некачественной подготовке [1]. Плазменные технологии нашли широкое применение [2–10] для очистки воды и других жидкостей от различных типов загрязнений: механических, химических, радиа-

ционных и биологических. Электрические разряды в воде чаще применяются для очистки от химических и биологических загрязнений. Неравновесная плазма рассматривается как наиболее перспективная, т. к. под её воздействием наиболее активно образуются химически активные радикалы. Сопутствующими благоприятными факторами являются ультрафиолетовое излучение, а также высокая напряженность поля, которая способствует электропорационной гибели патогенной микрофлоры. Эффективность применения электрического разряда экспериментально продемонстрирована в газожидкостных средах на модельных биологических загрязнителях *B.suptilus* и *E.coli* [11], *Staphylococcus aureus* [12]. Показано, что электрический разряд в гомогенных водных средах также эффективен для очистки от органических загрязнений [13].

В большинстве случаев, промышленные разряды в воде осуществляют при положительной полярности импульса напряжения на высоковольтном заостренном электроде, так как при положительной полярности требуется

Панов Владислав Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.
Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
Василяк Леонид Михайлович, гл.н.с., д.ф.-м.н.
Ветчинин Сергей Петрович, с.н.с., к.ф.-м.н.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.
E-mail: panovvladislav@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2020 г.

© Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., 2020

более низкая амплитуда напряжения. С технологической точки зрения, применение переменного напряжения является более простым техническим решением. Для очистки воды от примесей необходим кислород, для чего через воду пропускают пузырьки воздуха. Исследования импульсного пробоя в воде с пузырьками воздуха отрицательной полярности были выполнены нами ранее [14], однако механизмы развития разряда в таких условиях при положительной полярности острейного электрода пока исследованы недостаточно. Ниже представлены результаты экспериментального исследования влияния полярности импульса напряжения на высоковольтном электроде на развитие импульсного электрического разряда в воде с электропроводностью (90 ± 10) мкСм/см с микропузырьками воздуха и без них.

Экспериментальная установка

Для исследования была использована экспериментальная установка [14], модернизированная для условий данных исследований. Зарядка ударной емкости 0,75 мкФ осуществлялась высоковольтным источником постоянного тока *Spellman SL100PN300*, управляемым от компьютера. Для коммутации зарядной емкости был применён полупроводниковый высоковольтный ключ *Behlke HTS 301-03-GSM* с амплитудой напряжения до 30 кВ и током до 30 А, что позволило устранить коммутационные шумы, послеимпульсы напряжения и нестабильность переднего фронта формируемого импульса напряжения. Длительность фронта нарастания напряжения при коммутации составляет 0,7 мкс между уровнями 10 и 90 % амплитуды импульса напряжения. При подаче на ключ управляющего ТТЛ-импульса от генератора *BNC 575* на резистивной нагрузке формируется высоковольтный импульс напряжения, длительность которого равна длительности ТТЛ-импульса. Такое схемное решение позволяет управлять экспериментом с помощью компьютера. Высоковольтный импульс напряжения подавали на разрядную ячейку через балластное сопротивление 5 кОм. Устранение коммутационных шумов позволило регистрировать напряжение на высоковольтном электроде пассивным высоковольтным пробником напряжения *Tektronix P6015A* без использования дополнительных делителей,

что уменьшило погрешность измерений. Измерения тока разряда осуществлялись при помощи безиндуктивного резистивного шунта с величиной сопротивления 2 Ом. Электрические сигналы с шунта и пробника подавались на цифровой осциллограф *LeCroy HDO4054* с полосой пропускания 500 МГц, частотой выборки 2 ГГц и разрешением 12 бит, что позволяло регистрировать частичные незавершенные разряды в процессе развития пробоя. Фоторегистрация процессов в разрядном промежутке ведется фотокамерой *Phantom v2012* со скоростью до 1 млн. кадр/с и минимальной экспозицией кадра 290 нс с макрообъективом *Tokina Macro F2.8 D*. Теневой метод фоторегистрации был применен для визуализации объектов и процессов со слабым собственным свечением. Диагностические системы были синхронизированы с управляющими импульсами высоковольтного ключа.

Два вольфрамовых цилиндрических электрода диаметром 1,6 мм в системе «острие–штырь» были установленные горизонтально и соосно на расстоянии 1 см друг от друга внутри прямоугольной ёмкости из оргстекла объёмом (В×Ш×Г) $14 \times 10 \times 4$ см³. Рабочий торец «острия» имеет форму конуса с высотой 2,2 мм и радиусом скругления при вершине 50 мкм, рабочим торцом «штыря» служит шлифованная плоскость диаметром 1,6 мм. Перед началом каждого эксперимента электроды погружались в жидкий парафин, а затем, после его застывания, рабочие концы электродов очищались от парафина. Для создания микропузырьков вода предварительно выдерживалась при давлении воздуха 7 атм, в результате чего воздух растворялся в воде. При снижении давления до атмосферного, растворенный в воде воздух образует пузырьки диаметром 40 ± 10 мкм, которые равномерно распределены по всему объёму.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Развитие разряда было исследовано в диапазоне напряжений 5–25 кВ для следующих условий: острие-анод, без пузырьков; острие-анод, с пузырьками; острие-катод, без пузырьков; острие-катод, с пузырьками. Инициация разрядных каналов в воде без пузырь-

ков происходит в первые несколько микросекунд после подачи импульса напряжения амплитудой 8–9 кВ и на аноде, и на катоде (рис. 1, а). Следует отметить, что инициация канала на аноде в воде происходит не на острие (рис. 1, а), а вблизи контакта «металл-жидкость-изоляция», что свидетельствует о максимальной напряженности электрического поля в этой области. Аналогичная картина наблюдается и для штыревого анода (рис. 2, а).

При наличии пузырьков амплитуда напряжения пробоя снижается в среднем на 5–10 %, инициация плазменных каналов также происходит вблизи контакта «металл-жидкость-изоляция» и на аноде, и на катоде (рис. 1, б). Дальнейшее развитие плазменных каналов у острейного анода идет по пузырькам вдоль

поверхности изоляции электрода в противоположную от разрядного промежутка сторону. Этот эффект связан с влиянием поляризации воды с высокой диэлектрической проницаемостью на искривление линий электрического поля вблизи электродов и накоплением объемных зарядов ионов вблизи острия за счет проводимости воды, в результате чего напряженность поля у острия снижается. Объем инициированных каналов, развивающихся вблизи поверхности штыревого электрода, на порядок больше объема аналогичных каналов у острия вне зависимости от полярности электродов (рис. 1, б, 2, б). Такая ситуация вблизи электродов сохраняется и во время развития основного канала, приводящего к замыканию промежутка (рис. 2, б).

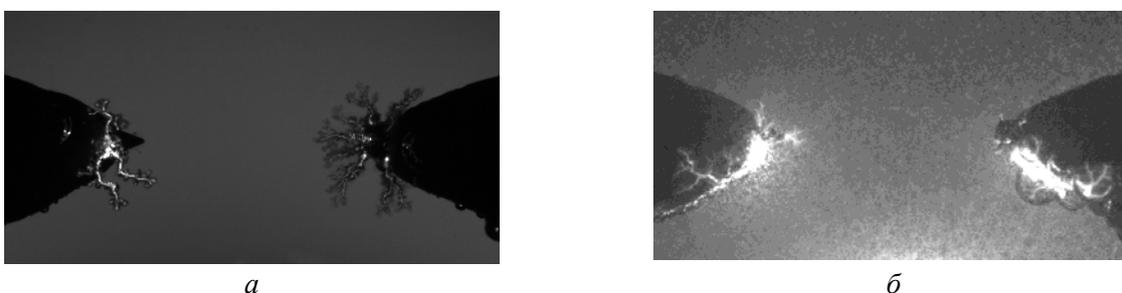


Рис. 1. Иницирование разрядных каналов через 2,5 мкс от подачи импульса напряжения амплитудой 13 кВ: а) – без пузырьков; б) – с воздушными микропузырьками. Острие – анод (слева).

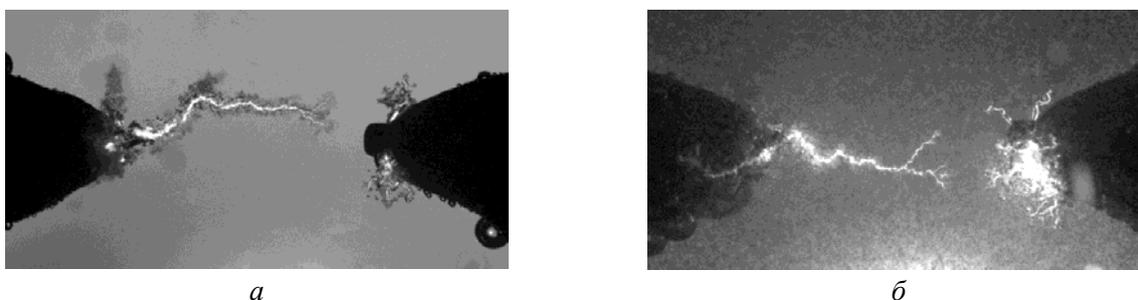


Рис. 2. Влияние пузырьков на траекторию разрядного канала в промежутке: а) – без пузырьков; б) – с воздушными пузырьками. Острие – катод (слева). Амплитуда напряжения 13 кВ. Траектория канала при наличии пузырьков более прямолинейна и лежит ближе к оси. Кадры непосредственно перед замыканием промежутка: а) – 350 мкс; б) – 364 мкс.

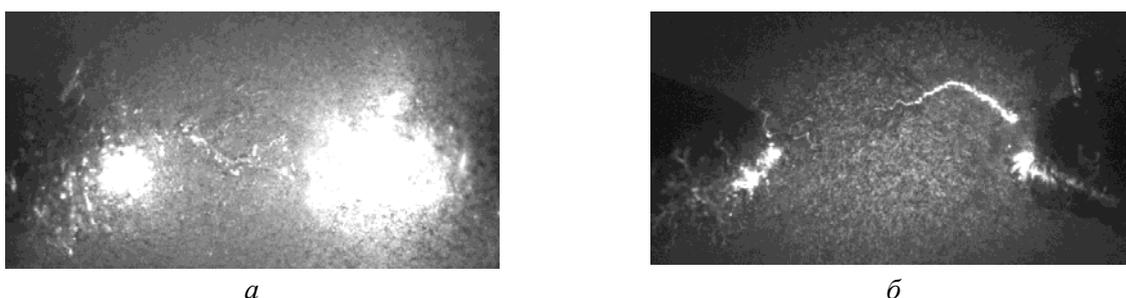


Рис. 3. Развитие основного разрядного канала в воде с воздушными микропузырьками: а) – с анода; б) – с катода. Амплитуда напряжения 10 и 13 кВ соответственно. Острие – анод (слева). Кадры непосредственно перед замыканием, время 1,5 мс (а) и 0,3 мс (б) после подачи напряжения.

С увеличением амплитуды напряжения меняется характер пробоя. Замыкание промежутка анодным каналом, характерное для околопробойных напряжений, сменяется замыканием промежутка каналом, развивающимся с катода. Данный переход происходит в диапазоне напряжений от 11 до 13 кВ. Скорость распространения катодного канала 35–80 м/с почти на порядок превышает скорость канала от анода 5–7 м/с. Это приводит к сокращению характерного времени пробоя с 2 до 0,2 мс. Зависимость скорости анодного и катодного каналов от амплитуды напряжения носит линейный характер. Однако скорость катодного канала нарастает медленнее с увеличением напряжения. Влияние пузырьков на допробойное время наиболее заметно для острейшего анода. В этом случае время замыкания промежутка анодным каналом сокращается примерно в два раза при одном и том же напряжении. Дополнительное влияние пузырьков выражается в изменении траектории катодного канала: она становится более прямой и лежит ближе к оси электродов (рис. 2).

Максимальный энергозатрат в промежуток реализуется при развитии основного канала с анода (рис. 3, а) при напряжениях, близких, но не превышающих напряжение перехода к развитию разряда с катода (рис. 3, б). Такой режим представляется наиболее оптимальным для очистки и обеззараживания воды, т. к. соответствует наибольшему объёму плазменных каналов без перехода в дуговую стадию.

Заключение

Установлено:

1. Инициация канала на аноде в жидкости происходит вблизи контакта металл-жидкость-изоляция вследствие влияния поляризационных эффектов на результирующую напряженность электрического поля.
2. При наличии воздушных микропузырьков при повышенном напряжении инициация каналов происходит на боковой от разрядного промежутка стороне электрода, далее канал растёт по пузырькам вдоль поверхности изоляции.
3. Максимальный энергозатрат наблюдается в диапазоне напряжений вблизи области

перехода от замыкания промежутка анодным каналом к катодному каналу.

4. Объём плазмы около анода больше, чем вблизи катода.
5. В воде с микропузырьками при повышении амплитуды напряжения развитие основного канала происходит с катода вне зависимости от его геометрии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01091.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Koncağul E., Tran M., Connor R., Uhlenbrook S.* The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind, facts and figures. UNESCO World Water Assessment Program, 2019.
2. *Шилов И. П., Кочмарев Л. Ю., Зубков Н. П., Лапшин Д. В.* // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 17.
3. *Балданов Б. Б., Ранжуров Ц. В., Сордонова М. Н., Будажапов Л. В.* // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 41.
4. *Титов В. А., Хлюстова А. В., Наумова И. К., Сироткин С. А., Агафонов А. В.* // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 35.
5. *Кралькина Е. А., Неклюдова П. А., Никонов А. М., Вавилин К. В., Задириев И. И.* // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 41.
6. *Акишев Ю. С., Петряков А. В., Трушкин Н. И., Устюгов В. А.* // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 20.
7. *Батанов Г. М., Бережецкая Н. К., Давыдов А. М., Кончечков Е. М., Каторгин И. Н., Косый И. А., Сарксян К. А., Степахин В. Д., Темчин С. М., Харчев Н. К.* // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 10.
8. *Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Савельев А. С.* // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 1.
9. *Magureanu M., Mandache N., Parvulescu V.* // Water Res. 2015. Vol. 81. P. 124.
10. *Chen Q., Li J., Li Y.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. Vol. 48. № 42. P. 424005.
11. *Акишев Ю. С., Грушин М. Е., Каральник В. Б., Монич 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. № 12. С. 1142.
12. *Liu F., Sun P., Bai N., Tian Y., Zhou H., Wei S., Zhou Y., Zhang J., Zhu W., Becker K., Fang J.* // Plasma Processes Polym. 2010. Vol. 7. P. 231.
13. *Foster J. E.* // Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 055501.
14. *Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. P. 085019.

Electrodes polarity effect on the development of breakdown in conductive water with air microbubbles

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

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

Received November 11, 2020

The influence of the polarity of electrodes with pin-to-rod geometry on the development of a pulsed electric discharge in water with electrical conductivity of (90 ± 10) $\mu\text{S}/\text{cm}$ with and without air microbubbles is experimentally investigated. It was found that the initiation of the plasma channel at the anode in water occurs near the metal-liquid-insulation contact for both investigated anode geometries. In the presence of bubbles at an increased voltage, the development of plasma channels after initiation occurs in the direction opposite to the discharge gap along the insulated surface of the electrodes. In the presence of bubbles, the amplitude of the breakdown voltage decreases, the initiation delay time and the total time of the breakdown development by the channel developing from the pointed anode decrease. Increase of voltage amplitude leads to the development of the channel from the cathode, regardless of its geometry.

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

REFERENCES

1. E. Koncagül, M. Tran, R. Connor, and S. Uhlenbrook, *The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind, facts and figures. UNESCO World Water Assessment Program* (2019).
2. I. P. Shilov, L. Yu. Kochmarev, N. P. Zubkov, and D. V. Lapshin, *Applied Physics*, No. 3, 17 (2019) [in Russian].
3. B. B. Baldanov, Ts. V. Ranzhurov, M. N. Sordonova, and L. V. Budazhapov, *Applied Physics*, No. 1, 41 (2019) [in Russian].
4. V. A. Titov, A. V. Khlyustova, I. K. Naumova, S. A. Sirotkin, and A. V. Agafonov, *Applied Physics*, No. 4, 35 (2019) [in Russian].
5. E. A. Kralkina, P. A. Nekliudova, A. M. Nikonov, K. V. Vavilin, and I. I. Zadiriev, *Applied Physics*, No. 4, 41 (2019) [in Russian].
6. Yu. S. Akishev, A. V. Petryakov, N. I. Trushkin, and V. A. Ustyugov, *Applied Physics*, No. 5, 20 (2017) [in Russian].
7. G. M. Batanov, N. K. Berezhetskaya, A. M. Davydov, E. M. Konchekov, I. N. Katorgin, I. A. Kossyi, K. A. Sarksyian, V. D. Stepakhin, S. M. Temchin, and N. K. Kharchev, *Applied Physics*, No. 5, 10 (2017) [in Russian].
8. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and A. S. Saveliev, *Applied Physics*, No. 5, 1 (2017) [in Russian].
9. M. Magureanu, N. Mandache, and V. Parvulescu, *Water Res.* **81**, 124 (2015).
10. Q. Chen, J. Li, and Y. Li, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 424005 (2015).
11. Yu. S. Akishev, M. E. Grushin, 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).
12. F. Liu, P. Sun, N. Bai, Y. Tian, H. Zhou, S. Wei, Y. Zhou, J. Zhang, W. Zhu, K. Becker, and J. Fang, *Plasma Processes Polym.* **7**, 231 (2010).
13. J. E. Foster, *Phys. Plasmas*. **24**, 055501 (2017).
14. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 085019 (2019).