

УДК 537.52
EDN: WDVWUJ

PACS: 52.80.-s



Влияние ультразвука на развитие импульсного электрического разряда в воде

В. А. Панов, В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк, Ю. М. Куликов,
А. С. Савельев, А. А. Филаткин

Экспериментально исследовано развитие электрического пробоя в воде с проводимостью 255 мкСм/см при воздействии ультразвуковых волн для геометрии электродов «острие–штырь» с межэлектродным промежутком 8 мм. Обнаружено, что при одинаковом напряжении, близком к минимальному пробойному, вероятность инициации пробоя и замыкания разрядом промежутка увеличивается в два раза при воздействии ультразвуком без создания кавитации, а время допробойной стадии сокращается по сравнению с пробоем без ультразвука.

Ключевые слова: электрический пробой, вода, ультразвук, тепловой пробой.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-29-34

Введение

Воздействие ультразвуковых (УЗ) волн широко применяется в промышленности для очистки поверхностей, для ультразвуковой сварки, в ультразвуковых профилометрах и расходомерах, для дегазации, перемешивания и обеззараживания жидкостей и т. д. [1–4]. В настоящее время проводятся активные исследования применения ультразвука для очистки водных растворов от различного рода примесей как в твердом, так и в жидком состоянии [5]. В зависимости от интенсивности воздействия возможна очистка как за счет коагуляции примесей в воде, так и диспергиро-

вания примесей в УЗ поле за счет кавитации, когда мощность УЗ излучения в воде превышает 2 Вт/см^2 [3]. Исследуется и применяется дробление частиц примеси за счет ударных волн, возникающих в жидкости при схлопывании кавитационных пузырьков [6, 7]. Коагуляция происходит в основном за счет парных столкновений диспергированных частиц примеси. Объединению частиц в более крупные способствует обтекание жидкостью частиц разных размеров, движущихся в жидкости с различными скоростями, при их вовлечении в колебательное движение [8]. Применение электрического разряда и кавитации приводит к интенсивной генерации радикалов, ультрафиолетового излучения, ударных волн и заряженных частиц для обработки воды. Такая гибридная технология очистки и обеззараживания воды обеспечивает синергетический эффект между двумя источниками энергии и может быть востребована в широком спектре промышленных применений [9].

В данной работе мы рассматриваем процесс воздействия УЗ волны на развитие импульсного электрического разряда в проводящей воде в неоднородном электрическом поле. Импульсный электрический пробой в

Панов Владислав Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: panovvladislav@gmail.com

Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Василяк Леонид Михайлович, гл.н.с., д.ф.-м.н.

Куликов Юрий Матвеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Савельев Андрей Сергеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Филаткин Алексей Андреевич, лаборант.

Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2022 г.

© Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М.,
Куликов Ю. М., Савельев А. С., Филаткин А. А., 2022

данных условиях развивается по тепловому механизму. Время теплового пробоя (ТП) составляет 1–4 мс, что существенно больше времени импульсного электрического пробоя в дистиллированной воде и связано с возникновением тепловой неустойчивости в жидкости вблизи высоковольтного электрода [10]. Механизм развития этого пробоя был нами исследован и описан в [11]. При критической плотности тока проводимости в жидкости в сильном электрическом поле вблизи высоковольтного электрода развивается перегревная неустойчивость, приводящая к быстрому вскипанию жидкости и образованию гетерогенной среды, состоящей из воды и парогазовых пузырьков [12]. В сильном неоднородном электрическом поле газные пузырьки ионизируются, что приводит к образованию плазмы и прорастанию плазменного канала в разрядном промежутке. Одновременное воздействие УЗ колебаний в безкавитационном режиме вблизи высоковольтного электрода на допробойной стадии может интенсифицировать процессы, приводящие к вскипанию жидкости и уменьшить напряжение пробоя и время зажигания разряда в проводящей воде [13, 14].

Целью данной работы являлось исследование развития импульсного разряда в проводящей воде с дополнительным воздействием ультразвуковой волны в безкавитационном режиме в разрядном промежутке.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Электроразрядная ячейка (1) представляет собой пластиковый цилиндр с внутренним диаметром 160 мм, в торцах которого на расстоянии 75 мм закреплены смотровые окна, выполненные из оптического стекла с постоянным по объему коэффициентом преломления, что позволяет проводить диагностику теньвым методом с ножом Фуко (6). Апертура для наблюдения теньвым методом всей области ультразвукового воздействия составляла 160 мм. Уплотнения по периметру смотровых окон обеспечивало герметичность и постоянство уровня воды в ячейке. Для создания отраженной УЗ волны в разрядной ячейке в нижней части ячейки помещалась пластина размером 60x117x5 мм. Ультразвуковой излучатель (2) размещался в верхней части ячейки. Диэлектрическая излучающая поверхность погружена в воду на 5 мм. Расстояние от излучающей поверхности до отражающей пластины подбиралось близким к кратному числу длин волн и составило 110 мм. На отражающей пластине размещен держатель с электродами с геометрией "острие-штырь" и межэлектродным промежутком 8 мм. Ячейка заполняется дистиллированной водой с добавкой соли Na_2SO_4 с удельным сопротивлением 3.92 кОм см (эквивалентная электропроводность 255 мкСм/см).

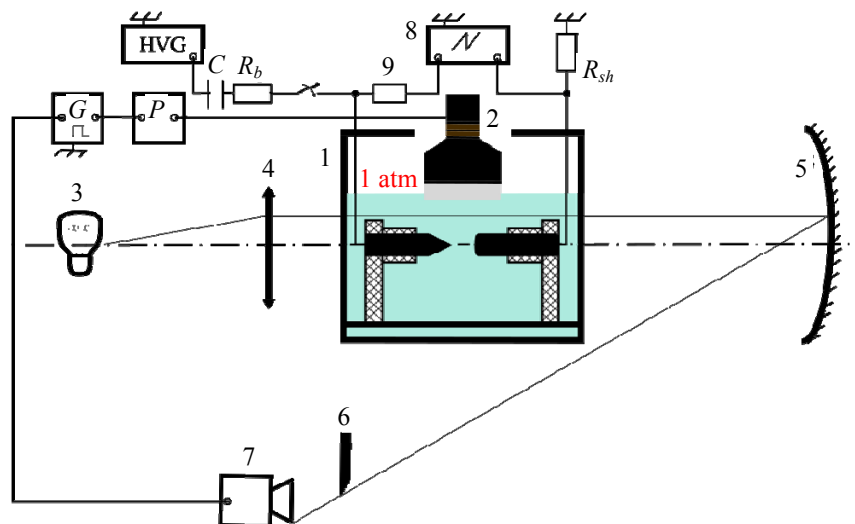


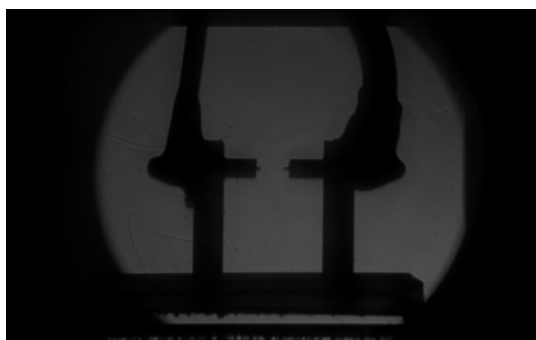
Рис. 1. Схема установки. 1 – разрядная ячейка; 2 – ультразвуковой излучатель; 3 – светодиод; 4 – длиннофокусная собирающая линза; 5 – сферическое зеркало; 6 – нож Фуко; 7 – высокоскоростная камера Phantom V2012; 8 – четырехканальный осциллограф LeCroy HDO4054; 9 – пассивный высоковольтный пробник напряжения Tektronix P6015A; HVG – высоковольтный источник питания Spellman 3000; C – система конденсаторов; R_b – балластное сопротивление; R_{sh} – шунт; G – универсальный генератор сигналов RIGOL DG4102; P – усилитель сигналов Power Amplifier Type 2713 компании Brüel & Kjær; сплошной синий – жидкость, штриховка – диэлектрические держатели электродов

Наблюдение за разрядным промежутком ведется при помощи длиннофокусного объектива Nikon с фокусным расстоянием 300 мм и микроскопа МБС-10, оборудованного оптическим выходом для подключения фотокамеры. Фоторегистрация процессов ведется скоростной фотокамерой Phantom v2012 (7). Длиннофокусный объектив используется для получения картины распределения ультразвуковых волн во всей ячейке, а с помощью микроскопа регистрируется детальная картина развития пробоя в разрядном промежутке с высоким разрешением. Визуализация процессов проводится шлирен методом. Световой поток, создаваемый светодиодом (3) в фокусе собирающей линзы (4), преобразуется в параллельный пучок, проходящий через разрядную ячейку (1). Прошедший через разрядную ячейку пучок света отражается от сферического зеркала (5) и попадает в объектив камеры (7). Преломленные оптической неоднородностью (разрядной областью) лучи отсекается диафрагмой (ножом Фуко) (6), что создает шлирен-изображение на матрице камеры.

Импульс напряжения формируется при помощи полупроводникового высоковольтного коммутатора (5) Behlke HTS 301-03-GSM, подключенного к ударной емкости (С). Емкость постоянно заряжается источником питания (DC) Spellman SL100PN300 до рабочего напряжения в режиме ограничения по току не

более 1 мА. Напряжение на высоковольтном электроде регистрируется при помощи пассивного высоковольтного пробника Tektronix P6015A, ток в цепи разрядного промежутка вычисляется по величине напряжения на токовом шунте R_s . Запись электрических сигналов ведется осциллографом LeCroy HDO4054. Синхронизированный запуск всех элементов осуществляется генератором импульсов (G) с регулируемыми задержками Berkeley Nucleonics BNC575. Балластное сопротивление $R_b = 5,5$ кОм; сопротивление токового шунта $R_s = 25$ Ом; ударная емкость $C = 0,77$ мкФ, амплитуда приложенного напряжения U_{ap} не более 12 кВ.

Синусоидальный сигнал с генератора G амплитудой 150 мВ подается на ультразвуковой излучатель (2) через усилитель мощности P. Излучатель настроен на резонансную частоту 133250 Гц, при которой достигается максимальная мощность излучения. Уровень мощности излучения для эксперимента выбирался близким, но не превосходящем кавитационный предел. Фотографии наблюдаемой области с разрядным промежутком без УЗ и с воздействием УЗ приведены на рис. 2. На рис. 2 видно, что при воздействии УЗ наблюдается пространственная картина чередования темных и светлых полос, соответствующих участкам сжатия и разряднения в воде от стоячей УЗ волны.



а



б

Рис. 2. Фотографии наблюдаемой области. а – без воздействия УЗ; б – с воздействием УЗ

Результаты и обсуждение

Для выявления влияния ультразвука на пробой был применен статистический подход [15]. Для этого было проведено несколько серий экспериментов при разных зарядных

напряжениях на ударной емкости С. В результате проведенных экспериментов было выявлено, что наиболее заметно эффект дополнительного ультразвукового воздействия проявляется при напряжениях на ударной емкости, в диапазоне, близком к пороговому

пробойному без ультразвука (9,3 кВ, пробой 12 из 20).

Статистически это выражается в удвоении вероятности наступления пробоя с включённым ультразвуком по сравнению с таковой в отсутствие поля. В таблице 1 представлено типичное число наступления пробоя в 20 запусках при различных значениях напряжения с высоковольтного генератора и длительности импульса 7,5 мс.

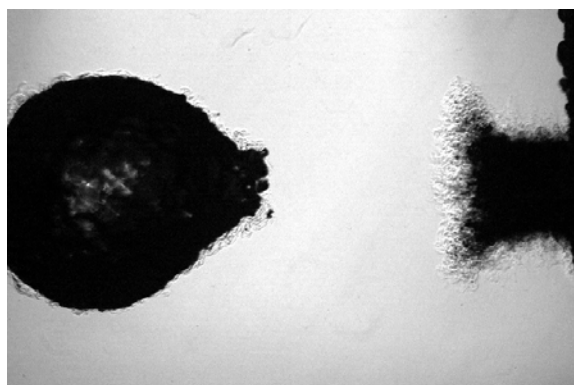
На рис. 3 представлены характерные фотографии разрядного промежутка в отсутствие пробоя и ультразвукового воздействия (а), серия № 3 без замыкания, и промежутка в момент перед замыканием под действием ультразвука (б), серия № 4, при напряжении зарядки ударной емкости 9,3 кВ. Анализ кинограмм показал, что после инициации пробоя вблизи острия анода, наблюдается увеличенная прикатодная плазменная область при воз-

действии ультразвуком. Более ранняя инициация пробоя у анода и более интенсивное плазмообразование у катода в результате приводят к увеличению вероятности пробоя при зарядном напряжении 9,3 кВ и уменьшению времени допробойной стадии.

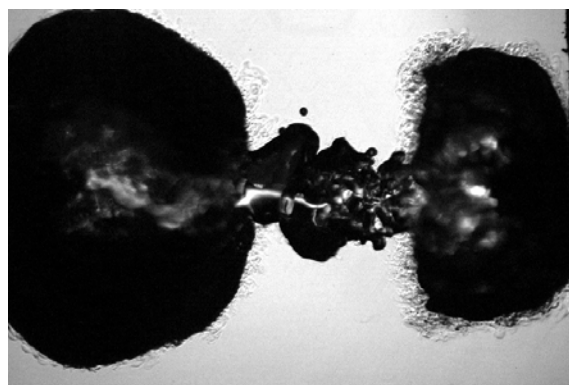
Таблица

Количество пробоев проводящей жидкости в присутствии и отсутствии ультразвука при различных напряжениях

Номер серии запусков	Ультразвук	Напряжение высоковольтного генератора, кВ	Число запусков с пробоем (из 20)
1	нет	10	10
2	есть	10	18
3	нет	9,3	6
4	есть	9,3	12



а



б

Рис. 3. Характерные изображения разрядного промежутка без УЗ поля и пробоя (а) и при дополнительном ультразвуковом воздействии в момент перед замыканием (б). Острие-анод слева, штырь-катод справа

На рис. 4 представлены характерные осциллограммы в условиях, соответствующих рис. 3: а) без УЗ поля и пробоя, б) при пробое с замыканием под воздействием УЗ поля. Практически сразу после подачи напряжения ток начинает расти при спадающем напряжении в обоих случаях (рис. 4а и 4б). Это связано с ионизацией и развитием плазменной области у острия анода. Характерный излом на сигнале тока и рост тока в момент времени 1,5 мс на рис. 4б связан с дополнительным интенсивным плазмообразованием вблизи катода при воздействии УЗ поля. Ток при этом возрастает в пределах 10 %, что приводит к

ускоренному падению напряжения при разрядке ударной емкости. Дополнительный излом на сигналах напряжения и скачок тока непосредственно перед замыканием (около четвертой миллисекунды, рис. 4б) связан с началом прорастания встречного канала с катода. Как правило, это происходит при значительном сближении плазменных областей анода и катода, а более высокая скорость прорастания катодного канала (примерно на порядок больше скорости канала с анода) приводит к очень короткому времени наблюдения этой стадии, на уровне десятков микросекунд.

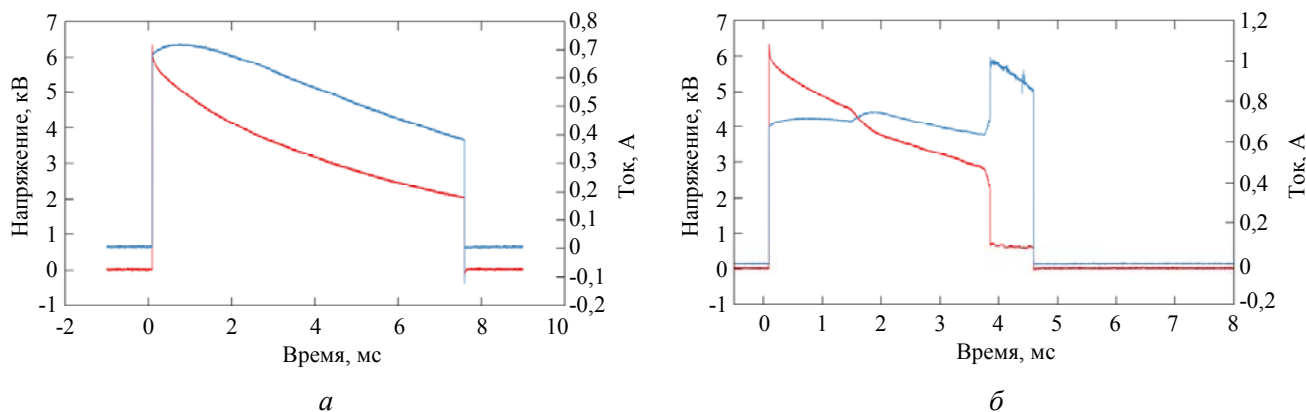


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения без УЗ поля при пробое (а) и для УЗ при пробое с замыканием (б)

Заключение

Воздействие ультразвука на воду приводит к повышению вероятности замыкания разрядного промежутка вблизи порогового напряжения пробоя, а также к снижению длительности допробойной стадии. Вероятность пробоя под действием ультразвука увеличивается в два раза.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1957.
2. Розенберг Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука. – М.: Наука, 1967.
3. Агранат Б. А. Ультразвуковая технология. – М.: Металлургия, 1974.

4. Matheny M. P., Graff K. F. // Ultrasonic welding of metals. – UK: Woodhead Publishing, 2015.
5. Викулина В. Б., Викулин П. Д. // Строительство: наука и образование. 2016. № 1. С. 31.
6. Golykh R. N. // American Journal of Engineering Research. 2016. № 11. P. 159.
7. Golykh R. N. // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2017. Vol. 10. № 5. P. 1235.
8. Мюллер Г. В. Теория коагуляции полидисперсных систем / под ред. Рабиновича А. И., Васильева П. С.). — М.: ОНТИ, 1936.
9. Abramov V. O., Abramova A. V., Cravotto G., Nikonov R. V., Fedulov I. S., Ivanov V. K. // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. № 70. P. 105323.
10. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. № 38. P. 385202.
11. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51. № 35. P. 354003.
12. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 61.
13. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Савельев А. С. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 5.
14. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 5.
15. Ushakov V. Y., Klimkin V. F., Korobeynikov S. M. Impulse Breakdown of Liquids. – Berlin: Springer, 2007.

Influence of ultrasound on the development of a pulsed electric discharge in conducting water

V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, Yu. M. Kulikov,
A. S. Saveliev and A. A. Filatkin

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: panovvladislav@gmail.com

Received 22 November, 2022

The development of an electrical breakdown in water with a conductivity of 255 microns/cm under the influence of ultrasonic waves for the geometry of "tip-pin" electrodes with an interelectrode gap of 8 mm has been experimentally investigated. It was found that at the same voltage, close to the minimum breakdown voltage, the probability of breakdown initiation and discharge closure of the gap increases by two times when exposed to ultrasound without cavitation, and the time of the pre-breakdown stage is reduced compared to the breakdown without ultrasound.

Keywords: electrical breakdown, water, ultrasound, thermal breakdown.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-29-34

REFERENCES

1. L. Bergmann, *Ultrasonics and Their Scientific and Technical Applications*. (United States Bureau of Ships, 1951).
2. L. D. Rozenberg, *Fizika i tehnika moshhnogo ultrazvuka*. (Nauka, Moscow, 1967) [in Russian].
3. B. A. Agranat, *Ultrazvukovaja tehnologija*. (Metallurgija, Moscow, 1974) [in Russian].
4. M. P. Matheny and K. F. Graff, *Ultrasonic welding of metals*. (Woodhead Publishing, UK, 2015).
5. V. B. Vikulina and P. D. Vikulin, *Construction: Science and Education*, **1**, 3 (2016).
6. R. N. Golykh, *American Journal of Engineering Research*, **11**, 159 (2016).
7. R. N. Golykh, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **11**, 1235 (2017).
8. G. V. Mjuller, *Teorija koaguljacii polidispersnyh system*. (ONTI, Moscow, 1936) [in Russian].
9. V. O. Abramov, A. V. Abramova, G. Cravotto, R. V. Nikonov, I. S. Fedulov and V. K. Ivanov, *Ultrasonics Sonochemistry* **70**, 105323 (2021).
10. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin and E. E. Son, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 385202 (2016).
11. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin and E. E. Son, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 354003 (2018).
12. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin and E. E. Son, *Plasm. Phys. Rep.* **42**, 1074 (2016).
13. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin and A. S. Saveliev, *Plasm. Phys. Rep.* **44**, 882 (2018).
14. V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin and A. S. Saveliev, *Plasm. Phys. Rep.* **47**, 623 (2020).
15. V. Y. Ushakov, V. F. Klimkin and S. M. Korobeynikov, *Impulse Breakdown of Liquids*. (Springer, Berlin, 2007).