

УДК 533.9.08:534.8

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА ДИНАМИКУ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОСТИ

Н. А. Булычев¹, М. А. Казарян¹, Л. Л. Чайков^{1,2}, П. И. Ивашкин³,
Р. А. Захарян³, А. С. Аверюшкин¹, А. А. Чернов⁴

Исследованы характеристики электрических разрядов в жидких средах под действием интенсивных ультразвуковых колебаний и показано различие динамики тока и напряжения разрядов при наличии кавитации и в её отсутствие.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, плазма, электрические разряды, вольт-амперные характеристики.

Проведенные ранее предварительные эксперименты позволили установить, что в жидкости в интенсивном ультразвуковом поле выше порога кавитации может существовать особая форма электрического разряда с объемным свечением во всем пространстве между электродами [1–4]. Такой разряд с развитой поверхностью микропузырьков представляет интерес для создания новых плазмохимических процессов, т.к. развитая поверхность раздела плазма–жидкость приводит к увеличению диффузионных потоков химически активных частиц из плазмы в жидкость [5–8]. В таком разряде потенциально возможно осуществить большое количество новых химических реакций. Проведенные ранее эксперименты показали, что в таком акустоплазменном разряде образуются наноразмерные частицы оксидов металлов, твердофазные углеродсодержащие продукты и газообразные продукты, происходят химические превращения в жидкой фазе [2, 9–13].

Для проведения экспериментальных работ по исследованию электрофизических характеристик такого разряда была сконструирована и изготовлена экспериментальная установка, состоящая из камеры-реактора, источника питания, ультразвукового генератора и пьезокерамического преобразователя.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: nbulychev@mail.ru.

² НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, д. 31.

³ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

⁴ Московский физико-технический институт, 141700 Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Схема и фотография установки приведены на рис. 1.

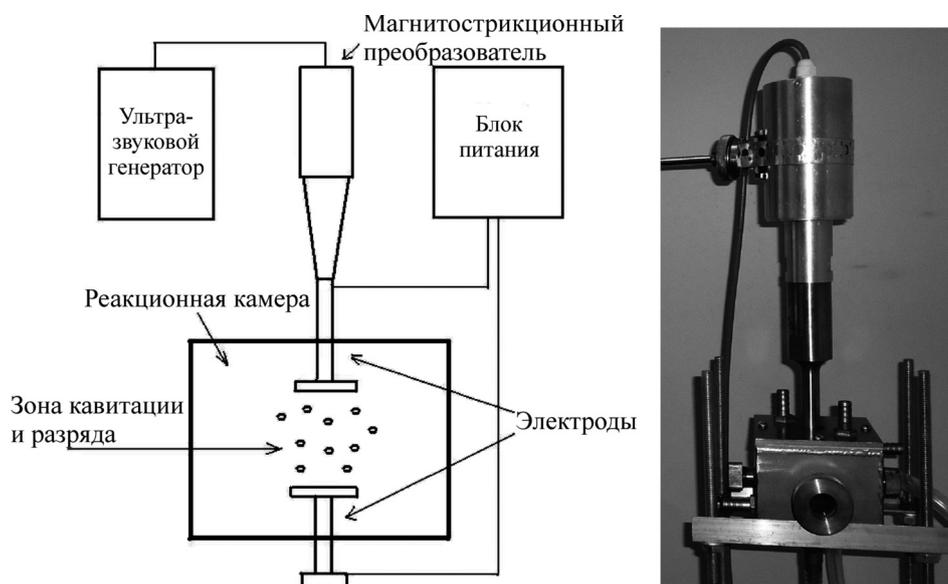


Рис. 1: Схема и фотография экспериментальной установки для реализации плазменного разряда в кавитирующей жидкости.

Электрическая схема источника питания приведена на рис. 2 в варианте, когда в качестве источника питания импульсного разряда в жидкости используется конденсатор C_1 , заряжаемый до напряжения $U = 300 - 500$ В.

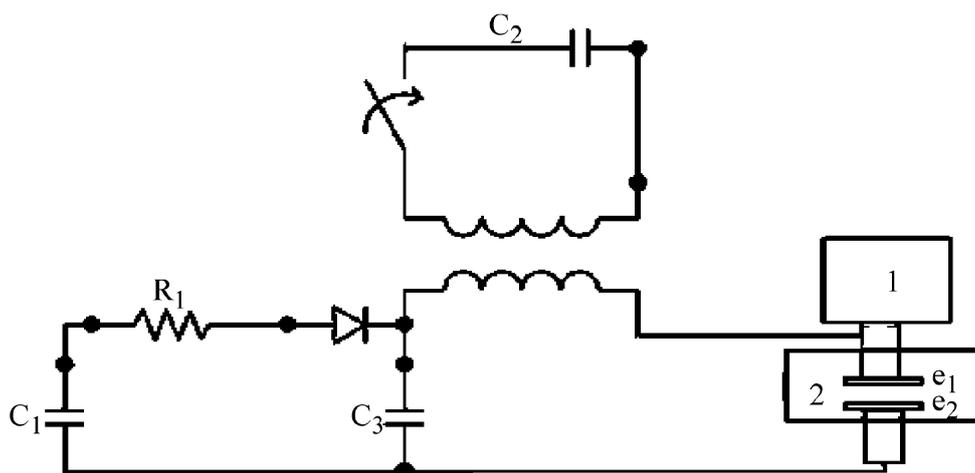


Рис. 2: Схема питания импульсного разряда в плазменном реакторе. 1 – ультразвуковой генератор, 2 – реакционная камера.

Инициирование разряда может осуществляться высоковольтным импульсом на вторичной обмотке импульсного трансформатора $ТХ_1$ при коммутации управляемым разрядником конденсатора $С_2$ в первичной обмотке этого трансформатора. Типичные параметры разрядного контура: напряжение зарядки конденсатора $С_2$: 5–10 кВ, коэффициент трансформации $ТХ_1$ – 4:1.

Ультразвуковой генератор с пьезокерамическим преобразователем обеспечивают регулирование выходной акустической мощности до 0.7 кВт в частотном диапазоне 35–47 кГц. Параметры акустического оборудования позволяют реализовать интенсивность ультразвукового поля в рабочем объёме жидкости до 10 Вт/см² и изменять режим кавитации в широких пределах.

Известно, что в зоне интенсивной кавитации доля парогазовой компоненты в жидкости имеет заметную величину, поэтому в фазе разрежения среды в ультразвуковой волне, когда давление в пузырьках заметно уменьшается, условия электрического пробоя в зоне кавитации облегчают возбуждение различных форм разряда от аномального тлеющего разряда до дугового.

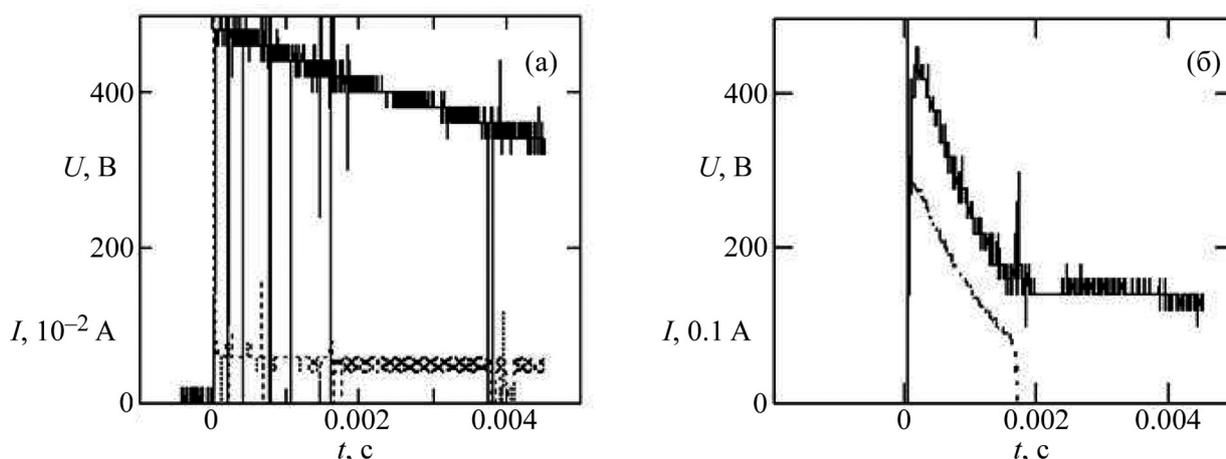


Рис. 3: Осциллограммы напряжения U на электродах (верхняя кривая) и разрядного тока I (нижняя кривая) при выключенном (а) и включенном (б) ультразвуковом генераторе. На оси ординат напряжение в вольтах, ток в амперах с масштабным множителем. На оси абсцисс время в секундах.

Типичные осциллограммы тока и напряжения при разряде конденсатора $С_1$ на разрядный промежуток в деионизированной воде с электродами из железа диаметром 5 мм и зазором между электродами 5–10 мм показаны на рис. 3(а). Конденсатор $С_1$ был заряжен предварительно до напряжения около 500 В при выключенном ультразвуковом

генераторе. Ток разряда не превышает 1 А, свечение отсутствует, сопротивление разрядного промежутка около 200 Ом, плотность тока разряда не более 0.05 А/см². При этом разряд шнуруется.

Характер импульсного разряда конденсатора C_1 кардинальным образом меняется при включении ультразвукового генератора и установке его мощности, превышающей порог кавитации (рис. 3(б)). Возникает довольно интенсивное свечение во всей области между электродами, продолжительность которого соответствует длительности импульса тока до момента его обрыва (на рис. 3(б) около 2 мс). Сопротивление разрядного промежутка составляет около 15 Ом в начале разряда и плавно нарастает до 20 Ом в момент, предшествующий обрыву тока. Такое соотношение напряжения на электродах и тока разряда характерно для тлеющего разряда. На осциллограмме напряжения наблюдаются флуктуации напряжения на разрядном промежутке. Обрыв тока разряда сопровождается коротким импульсом напряжения. Разряд при этом занимает весь объём межэлектродного пространства.

Кардинальное различие поведения напряжения и тока разряда свидетельствуют об изменении природы разряда под действием кавитации.

Заключение. Проведенные в ходе данной работы эксперименты позволили установить, что в жидкости в интенсивном ультразвуковом поле выше порога кавитации существует особая форма электрического разряда, характеризующаяся объемным свечением во всем пространстве между электродами, а также вольт-амперной характеристикой, присущей аномальному тлеющему разряду в газе.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №№ 15-02-03559-а, 14-02-00602-а, 14-02-92019 ННС_а.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Н. А. Булычев, М. А. Казарян, Е. С. Гриднева и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(7), 39 (2012).
- [2] Н. А. Булычев, М. А. Казарян, Л. Л. Чайков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(9), 33 (2014).
- [3] N. Klassen, O. Krivko, V. Kedrov, et al., IEEE Transactions on Nuclear Science **57**(3), 1377 (2010).
- [4] R. Balek, S. Pekarek, Z. Bartakova, Ultrasonics **44**, 549 (2006).
- [5] N. Sano, H. Wang, I. Alexandrou, et al., J. Appl. Phys. **92**(5), 2783 (2002).

- [6] E. Shibata, R. Sergienko, H. Suwa, T. Nakamura, Carbon **42**(4), 885 (2004).
- [7] Y. L. Hsin, K. C. Hwang, F. R. Chen, J. J. Kai, Adv. Mater. **13**, 830 (2001).
- [8] J. Ho Bang, K. S. Suslick, Adv. Mater. **22**, 1039 (2010).
- [9] Р. Ф. Ганиев, Н. А. Булычев, В. Н. Фомин и др., ДАН **407**(4), 35 (2006).
- [10] N. A. Bulychev, E. V. Kisterev, I. A. Arutunov, V. P. Zubov, Journal of the Balkan Tribological Association **1**(14), 30 (2008).
- [11] Н. А. Булычев, Неорганические материалы **46**(4), 451 (2010).
- [12] N. Bulychev, B. Dervaux, K. Dirnberger, et al., Macromolecular Chemistry and Physics **9**(211), 971 (2010).
- [13] N. Bulychev, O. Confortini, P. Kopold, et al., Polymer **48**(9), 2636 (2007).

Поступила в редакцию 23 июня 2015 г.