

Сравнительная характеристика горения подводного разряда типа торцевого на переменном и пульсирующем токах

С. В. Силкин, В. И. Парфенюк

Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН,
ул. Академическая, 1, г. Иваново, 153045, Россия, e-mail: SSV-bunker@rambler.ru

Сопоставлены временные характеристики тока и напряжения подводного разряда типа торцевого при зажигании на переменном и пульсирующем токах. Выяснено, что электрические характеристики разряда при горении на переменном и пульсирующем токах мало различимы в двух известных режимах горения подводного разряда. Установлены значения падения потенциала на газоразрядном промежутке и тока разряда, при которых происходит переход из одного режима горения в другой. Сопоставлены вольт-амперные характеристики горения разряда на переменном и пульсирующем токах и выяснено, что они имеют вид замкнутых кривых эллиптической формы, что говорит о колебательном режиме горения.

УДК 537.525

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение газоразрядной плазмы, контактирующей с растворами электролитов, представляет научный интерес [1–3]. Причины такого внимания к подобным разрядам связаны с возможностями получения плазменно-растворных систем при атмосферном давлении для новых применений (в экологии и промышленности для нанесения оксидных покрытий на материалы, включая полимеры, и др.) [4, 5].

В системе плазма–раствор, в которой зона плазмы находится над поверхностью электролитного катода [6], генерация активных частиц происходит в тонком поверхностном слое. Получение активных частиц внутри жидкой фазы под действием плазмы возможно в случае, когда оба электрода расположены в объеме жидкости, что позволяет более эффективно использовать их для инициирования химических процессов в растворе. Такие разряды называют «подводные». Другой особенностью подводных разрядов является квазиимпульсный характер горения с генерацией звуковой волны, что может оказывать влияние на протекание реакций в растворе и приводить к распылению материала электрода.

На протекание различных процессов, таких как распыление электродов и активация частиц в электролите, влияют электрические параметры горения разряда. Электрические характеристики плазменно-растворных систем, зажженных на переменном токе, были рассмотрены ранее [7]. В данной работе представлены результаты исследований по различию электрических характеристик горения подводного разряда типа торцевого в растворе электролита на пульсирующем и переменном токах.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Плазмохимической ячейкой служил стеклянный реактор объемом 0,5 л, в котором находятся электроды. В качестве одного из них использовался графитовый стержень диаметром 5 мм, помещенный в кварцевую трубку на расстоянии 5–10 мм от ее открытого конца. Разряд зажигался в кварцевой трубке. Графитовый электрод являлся анодом в случае зажигания разряда при пульсирующем токе. Второй электрод представлял собой стержень из нержавеющей стали диаметром 2 мм, находящийся в объеме электролита.

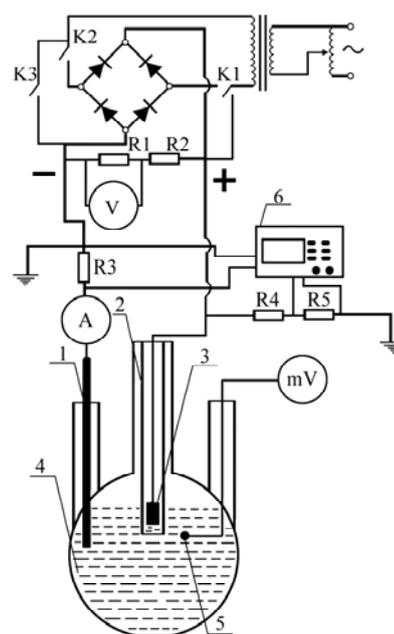


Рис. 1. Плазмохимический реактор для зажигания подводных разрядов: 1 – электрод из нержавеющей стали; 2 – кварцевая трубка; 3 – графитовый стержень; 4 – раствор электролита (жидкий катод); 5 – термопара; 6 – цифровой двухканальный осциллограф.

Рабочим электролитом служил раствор сульфата натрия с концентрацией 10^{-3} моль/л. Материал электродов и раствор электролита выбирали таким образом, чтобы максимально исключить влияние побочных эффектов [8].

Разряд возбуждали при различных напряжениях в диапазоне 1,5–9 кВ на переменном и пульсирующем токах, при этом ток менялся от 0,2 до 100 мА в зависимости от режима горения разряда. Для получения пульсирующего тока применяли мостовой двухполупериодный выпрямитель. Эксперимент проводили при постоянном значении тока в указанном выше диапазоне.

Ток разряда, падение напряжения и сдвиг фаз между ними регистрировались с использованием цифровых мультиметров DT 9207A и осциллографа GDS-806S с записью данных на компьютер при помощи АЦП. Погрешность измерения напряжения и тока составляла не более 5% при развертке этих величин с точностью 10^{-2} секунды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подводный торцевой разряд имеет по меньшей мере два режима горения, что подтверждают ранние эксперименты [7, 9]. Начальный режим горения реализуется при малых токах, порядка 0,2–3,5 мА, и напряжении 1,6–2,6 кВ (ниже 1,5 кВ пробой не наблюдался) при зажигании разряда как на переменном, так и пульсирующем токах. При этом разряд зажигается в газопаровом пузыре на границе раздела фаз газ/жидкость между электродом, помещенным в кварцевую трубку, и раствором. Разряд имеет вид отдельных микроразрядов, перемещающихся по периметру электрода. Более подробно «тихий» режим горения описан в [9]. Типичные осциллограммы горения разряда в «тихом» режиме, зажженные при ЭДС 2 кВ на пульсирующем и переменном токах, представлены на рис. 2. При этом устанавливался ток разряда до 10 мА при горении как на переменном, так и пульсирующем токах. Падение напряжения на разрядном промежутке при зажигании на переменном и пульсирующем токах составило 1,7–1,9 кВ. На всех приведенных осциллограммах ток и напряжение даны в относительных единицах, коэффициенты пересчета в единицы СИ равны 1/21 и 2040 соответственно.

Период зажигания разряда на пульсирующем и переменном токах составляет 10 мс. При этом на переменном токе разряд зажигался как в фазе, так и противофазе, таким образом, осуществлялось анодное и катодное горение разряда. Переход в активную форму горения разряда осуществлялся при напряжении свыше 3 кВ, при этом происходил пробой газопарового пузыря. В

момент пробоя газопаровой оболочки разряд гаснет, электрические параметры скачкообразно изменяются: ток разряда увеличивается, а напряжение на газоразрядном промежутке падает до десятков вольт (рис. 3).

Затем зажигание разряда в активном режиме происходит после образования новой газопаровой оболочки, при этом плазма занимает весь объем между поверхностью электрода и торцом трубки, после чего плазменное образование выталкивается из трубки, и разряд гаснет. В момент выброса газопаровой оболочки за пределы открытого конца трубки новая порция электролита заполняет все свободное пространство трубки. Схлопывание газопарового пузыря сопровождается возникновением звуковой волны и характеризуется скачкообразным изменением электрических параметров разряда. Далее процесс повторяется. Согласно сценарию развития торцевого разряда в активном режиме, описанному в [9], разряд зажигается и гаснет за короткий промежуток времени. В момент пробоя падение потенциала на газоразрядном промежутке скачкообразно возрастает до значений, близких к приложенному на электроды напряжению; ток разряда соответственно падает (рис. 4).

Вольт-амперные кривые подводного торцевого разряда, построенные по осциллограммам тока и напряжения, имеют вид замкнутых кривых эллиптической формы (рис. 5), что говорит о колебательном режиме горения разряда. Кроме того, данные ВАХ показывают сдвиг фаз, связанный с емкостной составляющей в электрической цепи. По нашим оценкам, сдвиг фаз, вычисленный по фигурам Лиссажу, составляет $14^{\circ} \pm 1^{\circ}$.

Для выяснения того, с чем связана емкостная составляющая, был проведен эксперимент, в котором вместо плазмохимической ячейки к выводам на электроды подключали активное сопротивление, равное сопротивлению газоразрядного канала. Осциллограммы данного эксперимента показали наличие такого же по величине сдвига фаз, как и при подключении плазмохимической ячейки. Таким образом, емкостную составляющую между торцом графитового электрода и электролитом можно исключить и рассматривать межэлектродное пространство как активнее сопротивление.

Вольт-амперные характеристики перехода из одного режима в другой при горении на переменном токе представляют собой пересекающиеся замкнутые кривые эллиптической формы (рис. 6а). Данные ВАХ показывают скачкообразный переход из области высоких напряжений и низких токов в область низких напряжений и высоких токов.

Усредненные за достаточно большой период

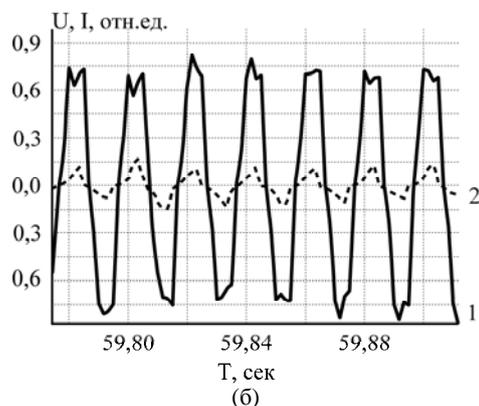
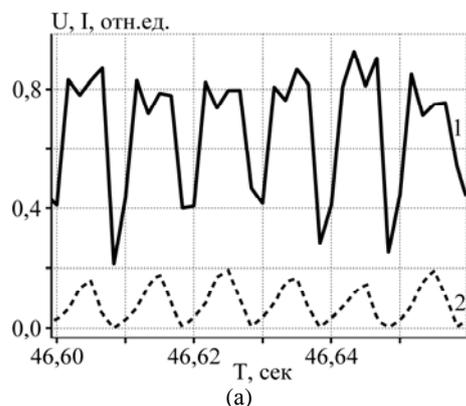


Рис. 2. Осциллограмма горения разряда в «тихом» режиме (ЭДС – 2 кВ) на переменном (а) и пульсирующем токах (б); 1 – напряжение; 2 – ток.

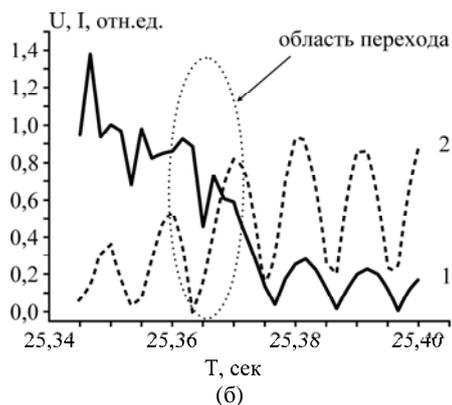
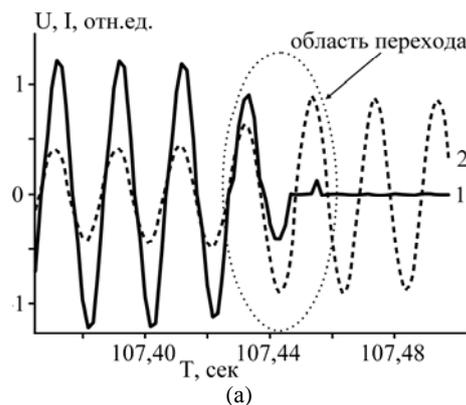


Рис. 3. Осциллограмма перехода из «тихого» режима в «активный» при горении разряда на переменном (а) и пульсирующем токах (б); 1 – напряжение; 2 – ток.

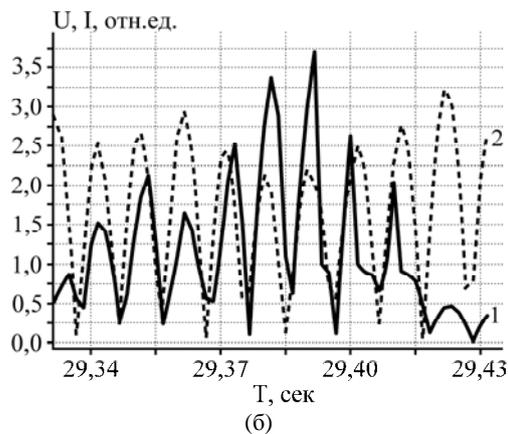
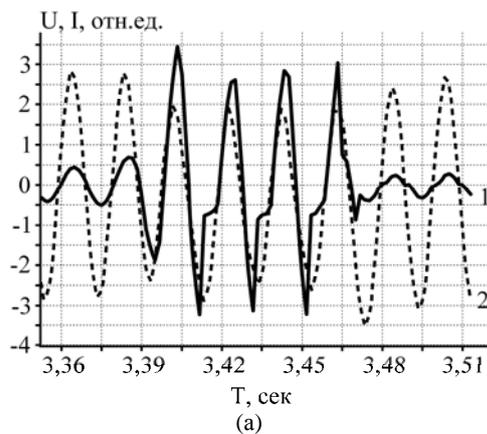


Рис. 4. Осциллограмма горения разряда в «активном» режиме (ЭДС – 7,7 кВ) на переменном (а) и пульсирующем токах (б); 1 – напряжение; 2 – ток.

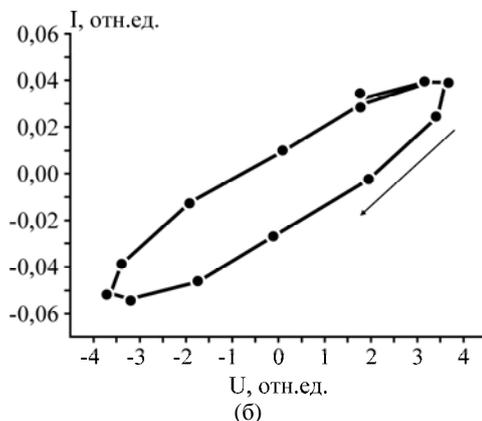
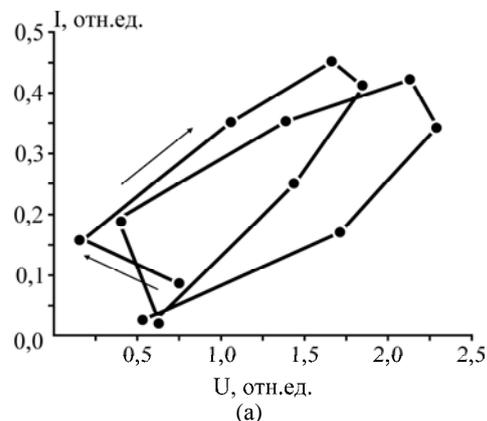


Рис. 5. ВАХ горения торцевого разряда в «тихом» режиме: (а) – на переменном (ЭДС – 2 кВ); (б) – пульсирующем токах (ЭДС – 2 кВ).

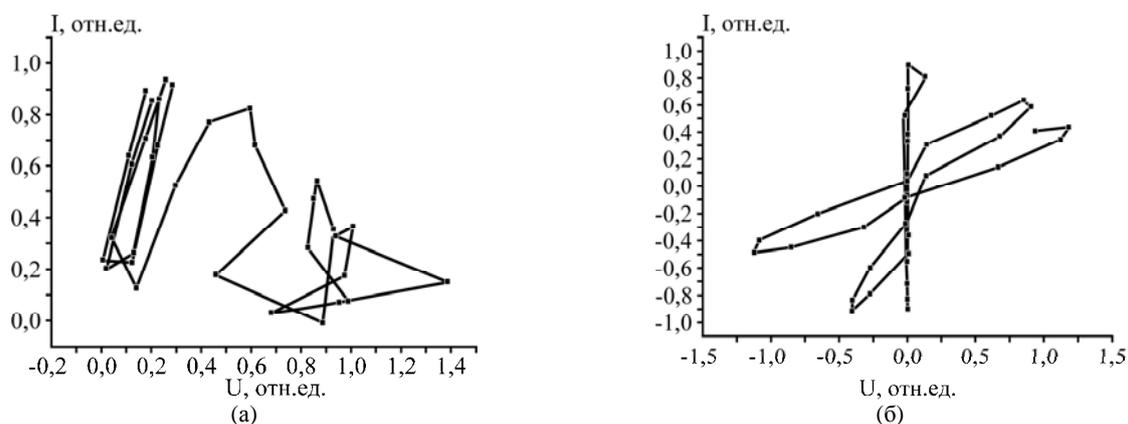


Рис. 6. ВАХ перехода из одного режима в другой при горении разряда на переменном (а) и пульсирующем токах (б).

времени соотношения между падением напряжения и тока имеют вид возрастающей характеристики. Это согласуется с тем фактом, что разряд горит устойчиво, без балластного сопротивления в цепи.

ВЫВОД

Зажигание подводного разряда типа торцевого на переменном и пульсирующем токах в электролите Na_2SO_4 с концентрацией 10^{-3} моль/л при напряжениях порядка 1,5–2,6 кВ приводит к реализации «тихого» режима горения. Переход в активный режим горения осуществляется при напряжении порядка 3 кВ. Электрические параметры горения разряда на переменном и пульсирующем токах мало различимы в обоих режимах горения. Межэлектродное пространство при «тихом» и активном режимах горения разряда не обладает реактивным сопротивлением, а представляет собой активное сопротивление. Сценарий развития подводного разряда на пульсирующем токе аналогичен сценарию развития на переменном токе, описанному в [9].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-03-31297-мол-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайсин А. Ф., Сон Э. Е. Паровоздушные разряды между электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении. *Теплофизика высоких температур*. 2005, **43**(1), 5–10.
2. Stark R.H., Schoenbach K.H. Direct Current High-pressure Glow Discharge. *Appl. Phys.* 1999, **85**(4), 2075–2080.
3. Bruggeman P., Ribezl E., Maslani A. et al. Characteristics of Atmospheric Pressure Air Discharge with a Liquid Cathode and a Metal Anode. *J. Plasma Sources Sci. Technol.* 2008, **17**, 1–10.
4. Locke B.R., Sato M., Sunka P. et al. Electrohydraulic Discharge and Nonthermal Plasma for Water Treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006, **45**(2), 882.
5. Стройкова И.К., Максимов А.И. Обеззараживание растворов тлеющим и диафрагменным разрядами атмосферного давления. *Электронная обработка материалов*. 2002, **38**(6), 43–49.
6. Кутепов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование материалов. М.: Наука. 2004. 496 с.
7. Хлюстова А.В., Манахов А.М., Максимов А.И., Хорев М.С. Связь электрических и оптических свойств плазменно-растворных систем. *Электронная обработка материалов*. 2009, **45**(5), 18–23.
8. Кузьмичева Л.А., Максимов А.И., Титова Ю.В. Образование пероксида водорода под действием тлеющего разряда атмосферного давления на водные растворы. *Электронная обработка материалов*. 2004, **40** (4), 57–61.
9. Хлюстова А.В., Манахов А.М., Максимов А.И. Один сценарий развития низковольтного «подводного» разряда. *Электронная обработка материалов*. 2009, **45**(6), 59–63.

Поступила 19.06.12
После доработки 15.10.12

Summary

The temporary characteristics of current and voltage of an underwater face discharge are compared at ignition on alternative and pulsating currents. It is demonstrated that electric characteristics of an underwater discharge at alternative and pulsating currents are the same in the two known combustion regimes. The values of the potential drop at the gas discharge and of the discharge current at transition from one active mode to the other are determined. The current-voltage characteristics of discharge combustion at alternating and pulsating currents are compared. It has been established that they are curves of a closed type and of elliptical shape. It means that the regime of combustion is oscillatory.