

# Влияние звуковой волны на разрушение графитового электрода в подводном торцевом разряде

С. В. Силкин, В. И. Парфенюк

---

Изучено влияние звуковой волны, возникающей при горении подводного торцевого разряда, на разрушение графитового электрода. Показано, что мощность звуковых колебаний при разных условиях горения разряда не превышает 20 мВт, а скорость разрушения графита —  $10^{-5}$  мг/мин. Сопоставление скорости разрушения графитового электрода под действием звуковых колебаний с другими каналами его разрушения (на четыре порядка ниже ионной бомбардировки и на два порядка ниже эрозии под действием активных окислителей) показало, что действие звуковой волны крайне незначительно и им можно пренебречь по сравнению с другими каналами разрушения электрода. Варьирование расстояния от торца электрода до среза сопла в изученных пределах (0,5 – 2,0 см) принципиально не влияет на характер воздействия звуковой волны на поверхность электрода.

**Ключевые слова:** графитовый электрод, подводный разряд, диспергирование, звуковая волна.

---

## Введение

Известно, что электрические разряды, совмещенные с жидкостью, сопровождаются возникновением звуковой волны [1 – 3]. В настоящее время ее роль в протекании физико-химических процессов мало изучена. Вместе с тем, генерация звуковых и, тем более, ударных волн может существенно повлиять на ход химических реакций, приводя к появлению новых активных окислительных частиц [4], а также участвовать в физических процессах, таких как разрушение электрода.

Наблюдая за свойствами торцевого разряда, было замечено, что горение в активном режиме сопровождается звуковыми колебаниями. Более подробно режимы горения подводного торцевого разряда обсуждены в [5, 6]. Ранее было рассмотрены диспергирование графитового анода при горении подводного торцевого разряда, которое связывали с ионной бомбардировкой поверхности электрода [7, 8], а также эрозия графитового катода в тех же условиях горения разряда, которую связывали с химическим взаимодействием материала электрода с активными окислительными частицами в плазме [9]. При возбуждении торцевого разряда на переменном токе так же происходит эрозия графитового электрода. Кроме того, было выяснено, что электролиз,

сопутствующий горению торцевого разряда, не оказывает влияние на разрушение электрода. Однако в этих работах не рассматривали влияние звуковых колебаний, возникающих в ходе горения торцевого разряда, на разрушение электрода.

Цель данной статьи — оценка влияния звуковой волны, генерирующейся при горении подводного торцевого разряда в процессе диспергирования графитового электрода.

## Методика эксперимента

Влияние звуковой волны на диспергирование электрода изучали в два этапа. На первом этапе получали спектры звуковых колебаний при горении торцевого разряда в активном режиме. На втором этапе исследовали состояние поверхности графитового электрода до и после воздействия на него звуковых колебаний с частотами и мощностями, определенными на первом этапе без зажигания разряда.

Действие звуковой волны, возникающей в результате горения торцевого разряда, оценивали при возбуждении разряда на постоянном и переменном токах в 0,001 М растворе сульфата натрия и в активном режиме горения разряда при токе 45 – 100 мА. При зажигании разряда на постоянном токе исследования

проводили как при положительной, так и отрицательной полярности графитового электрода. В качестве электрода использовали графитовые стержни марки ЭГ-20 диаметром 6 мм.

Спектры звуковых колебаний получали записывая звуковую информацию с микрофона на компьютер с помощью программы Audacity 2.0. Микрофон располагали внутри реактора над поверхностью раствора в 40 мм от зоны плазмы, как показано на рис. 1. Время записи составляло 30 с. Запись звуковых колебаний проводили при разных расстояниях от торца электрода до среза кварцевой трубки (1,0, 2,0 и 0,5 см) и различных токах разряда в указанном диапазоне, как при горении разряда на постоянном (с положительной и отрицательной полярностью графитового электрода), так и переменном токе. Полученную информацию обрабатывали и анализировали в программе Origin Lab Pro 7.

На следующем этапе исследовали состояние поверхности графитового электрода до и после действия звуковых колебаний заданной частоты без зажигания разряда. Для этого использовали генератор колебаний ГЗ-36А с диапазоном 2 Гц – 200 кГц. Излучатель располагали на дне плазмохимической ячейки так, чтобы колебания были направлены вдоль ее оси. Графитовый электрод в кварцевой трубке располагали также вдоль оси реактора навстречу звуковому потоку (рис. 1). Эксперименты проводили в диапазоне частот 1 Гц – 20 кГц при мощности звука 50 дБ в течение 60 минут.

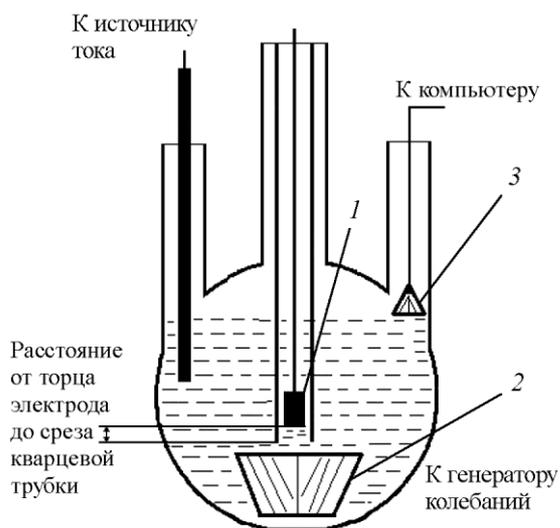


Рис. 1. Плазмохимическая ячейка для изучения действия звуковой волны на разрушение электрода: 1 – графитовый электрод, 2 – излучатель, 3 – микрофон.

По окончании воздействия звуковой волны на графитовый электрод-мишень изучали состояние его поверхности по методике, описанной в [9].

### Обсуждение результатов

Спектры звуковых колебаний торцевого разряда, полученные при горении на переменном и постоянном токе (с электролитическим катодом и электролитическим анодом), имеют пики в области 2,5, 10 и 20кГц (рис. 2). Наличие пика в области 20 кГц свидетельствует о появлении низкочастотного ультразвука в плазменно-растворной системе.

По данным спектрам была рассчитана мощность звуковой волны вблизи поверхности графитового электрода. Расчет проводили, исходя из следующих соображений. Используемый в экспериментах микрофон имеет сопротивление  $R_m$  равное 2,2 кОм и чувствительность  $E = 62$  мВ/Па.

Сигнал на микрофон поступает в виде электрической мощности  $P$ , которая связана с сопротивлением микрофона

$$P = \frac{U^2}{R_m}; U = \sqrt{PR_m}, \quad (1)$$

где  $U$  — действующее значение напряжения на микрофоне.

Связь действующего напряжения на микрофоне со звуковым давлением осуществляется через чувствительность микрофона  $E$ :

$$p = \frac{U}{E}. \quad (2)$$

Интенсивность звуковой волны связана со звуковым давлением  $p$ :

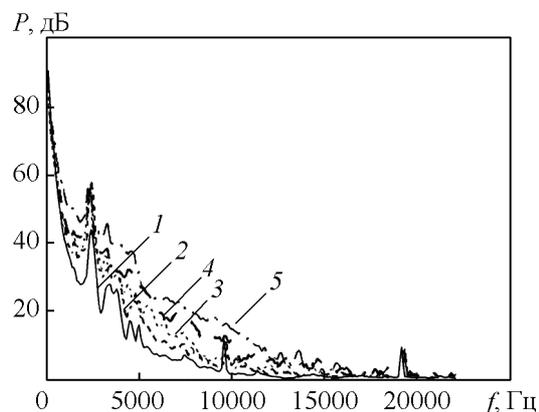


Рис. 2. Спектры звуковых колебаний торцевого разряда при горении на постоянном токе с электролитическим катодом, мА: 1 – 45; 2 – 55; 3 – 65; 4 – 90; 5 – 100. Расстояние от торца электрода до среза кварцевой трубки 1 см.

Мощность звуковых колебаний вблизи поверхности графитового электрода при разных условиях горения разряда

Ток разряда, мА	Мощность звуковых колебаний, мВт								
	Горение на постоянном токе с электролитическим катодом			Горение на постоянном токе с электролитическим анодом			Горение на переменном токе		
	Расстояние от торца электрода до края сопла			Расстояние от торца электрода до края сопла			Расстояние от торца электрода до края сопла		
	1 см	2 см	0,5 см	1 см	2 см	0,5 см	1 см	2 см	0,5 см
45	0,574	0,031			0,086	0,017	1,50	0,010	0,11
55	0,54	0,91	0,015	0,029	0,116	0,025			
60							2,20	0,012	0,155
65	3,28	1,25	0,022	0,032	0,146	0,02			
70							16,0	0,026	0,187
75	6,7	4,33	0,11	0,073	0,087	0,036			
85							17,0	0,066	0,54
90	12,0	11,0	0,185	0,24	0,094	0,029			
100	16,0	20,0	0,29	0,32	0,153	0,022	19,0	0,077	0,656

$$I = \frac{P^2}{z_s} \quad (3)$$

где  $z_s$  — акустическое сопротивление среды.

Считаем, что основным компонентом парогазовой оболочки является водяной пар, тогда  $z_s$  будет определяться:

$$z_s = \rho c, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность среды (598 кг/м<sup>3</sup>),  $c$  — скорость звука в ней (401 м/с).

Изменение интенсивности звуковой волны обратно пропорционально квадрату расстояния от источника звука  $r$

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 \left( \frac{A}{r} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\omega$  — циклическая частота колебаний,  $A$  — амплитуда колебаний.

Расстояние от источника звука до приемника (микрофона) приблизительно в 10 раз больше чем от источника звука до поверхности графитового электрода. Таким образом, интенсивность звуковой

волны вблизи графитового электрода ( $I_{гр}$ ) в 100 раз выше, чем в месте ее регистрации ( $I$ ):

$$\frac{I_{гр}}{I} = \frac{\frac{1}{2} \rho c \omega^2 \left( \frac{A}{r} \right)^2}{\frac{1}{2} \rho c \omega^2 \left( \frac{A}{10r} \right)^2}, \quad I_{гр} = 100I. \quad (6)$$

Таким образом, мощность звуковых колебаний у поверхности электрода определяется как:

$$W = 100IS, \quad (7)$$

где  $S$  — площадь поверхности графитового электрода

Изучено влияние геометрии реактора на изменение звуковых спектров разряда. Для этого положение торца графитового электрода изменяли относительно среза сопла вдвое от исходного расстояния (1 см). Значения мощности звуковых колебаний вблизи поверхности графитового электрода при разных условиях горения разряда, приведены в табл. 1.

Спектры мощности звуковых колебаний, полученные при разных расстояниях от торца электрода до края среза сопла, имеют подобный вид спектров

Сопоставление каналов разрушения графитового электрода

Вид разрушения графитового электрода	Скорость разрушения графитового электрода при токе разряда 100 мА, мг/мин		Основной канал разрушения электрода
	Тихий режим	Активный режим	
Анодное диспергирование	0,02 [7]	0,6 [7]	Ионная бомбардировка отрицательными ионами
Катодная эрозия	—	<0,001 [9]	Взаимодействие материала электрода с активными окислительными частицами
Эрозия электрода при возбуждении разряда на пере-	—	< 0,0015 [9]	Взаимодействие материала электрода менном токе с активными окислительными частицами, возможна ионная бомбардировка
Влияние звуковой волны		$\approx 10^{-5}$	

представленных на рис. 2. Тенденция появления пиков в области 2,5, 10 и 20 кГц сохраняется во всех спектрах. Как видно из табл. 1 мощность звуковых колебаний при разных условиях горения разряда не превышает 20 мВт. Изменение расстояния от торца электрода до края сопла не приводит к существенному изменению формы спектра и мощности звуковых колебаний. Таким образом, можно считать, что изменение расстояния от торца электрода до среза сопла в данных пределах принципиально не влияет на характер воздействия звуковой волны на поверхность электрода.

Результаты изучения диспергирующего действия звуковой волны на графитовый электрод, в котором звуковые колебания генерировались в плазмохимической ячейке с помощью генератора колебаний ГЗ-36А в течение 1 ч, показали, что скорость его разрушения не превышает  $(5 - 6) \cdot 10^{-4}$  мг/ч. При этом использовали “оценку сверху”, считая, что микронеровности имеют цилиндрическую форму:

$$\Delta m = \rho (Sh - S_0 h_0), \quad (8)$$

где  $S_0$ ,  $S$  — суммарная площадь исходных микровпадин и эродировавших участков электрода после обработки,  $h_0$ ,  $h$  — средняя глубина микровпадин электрода до и после облучения,  $\rho$  — плотность графита.

Полученную оценку скорости разрушения графитового электрода под действием звуковых колебаний, генерирующихся при горении торцевого разряда, сопоставляли с другими каналами разрушения электрода (табл. 2). Как видно из табл. 2, ролью звуковых колебаний, генерирующихся при горении торцевого разряда, в разрушении электрода можно пренебречь по сравнению с другими каналами разрушения.

## Вывод

Изучено разрушение графитового электрода под действием звуковой волны, возникающей при горении торцевого разряда. Мощность звуковых колебаний при разных условиях горения разряда не превышает 20 мВт.

Скорость разрушения графита в рассматриваемом реакторе составила не более  $10^{-5}$  мг/мин. Эта величина на два порядка ниже, чем скорость эрозии графитового электрода при горении разряда с электролитическим анодом, а также при горении на переменном токе, и на четыре порядка ниже, чем скорость диспергирования графитового электрода при горении разряда с электролитическим катодом. Данный факт свидетельствует о том, что действием звуковой волны крайне незначительно и им можно

пренебречь по сравнению с другими каналами разрушения электрода. Изменение расстояния от торца электрода до среза сопла в изученных пределах (0,5 – 2,0 см) принципиально не влияет на характер воздействия звуковой волны на поверхность электрода.

## Литература

1. Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. М.: Наука, 2004, 496 с.
2. Bruggeman P., Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. J. Physics D: Applied physics, 2009, v. 42, p. 053001 (28 p).
3. Максимов А.И., Стройкова И.К. Сопоставление активирующего действия тлеющего и диафрагменного разрядов в водных растворах. Электронная обработка материалов 2003, т. 39, № 1, с. 52 – 58.
4. Маргулис М.А. Основы звукохимии. Химические реакции в акустических полях. М.: Высшая школа, 1984, 272 с.
5. Хлюстова А.В., Манахов А.М., Максимов А.И., Хорев М.С. Связь электрических и оптических свойств плазменно-растворных систем. Электронная обработка материалов. 2009, т. 45, № 5, с. 18 – 23.
6. Силкин С.В., Парфенюк В.И. Сравнительная характеристика горения подводного разряда типа торцевого на переменном и пульсирующем токах. Электронная обработка материалов, 2013, т. 49, № 1, с. 86 – 89.
7. Силкин С.В. Кинетика распыления графитового анода в подводном торцевом разряде. Изв. ВУЗов. Химия и хим. технол., 2013, т. 56, № 1, с. 59 – 62.
8. Силкин С.В., Парфенюк В.И. Плазменно-электролитная обработка графитового электрода в подводном торцевом разряде. Перспективные материалы, 2014, № 3, с. 63 – 66.
9. Силкин С.В., Максимов А.И. Оценка кинетики диспергирования графитового электрода в подводном торцевом разряде. Изв. ВУЗов. Химия и хим. технол., 2013, т. 56, № 3, с. 99 – 101.

## References

1. Kutepov A.M., Zacharov A.G., Maximov A.I. *Vakuumno-plazmennoe i plazmennno-rastvornoe modifitsirovanie polimernykh materialov* [Vacuum-Plasma and Plasma-Solution Modification of Polymer Materials]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 496 p.
2. Bruggeman P., Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. J. Physics D: Applied physics, 2009, vol. 42, pp. 053001(28 p).
3. Maksimov A.I., Stroykova I.K. Sopotavlenie aktiviruyushchego deistviya tleyushchego i diafragmennogo razryadov v vodnykh rastvorakh [Comparison of the Activating Effect of Glow and Diaphragm Discharges in

- Water Solutions]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Surface engineering and applied electrochemistry*, 2003, vol. 39, no. 1, pp. 52 – 58.
4. Margulis M.A. Osnovy zvukokhimii. *Khimicheskie reaktsii v akusticheskikh polyakh* [Basics Sonochemistry. Chemical reactions in the acoustic field]. Moscow, Vyshaya Shkola Publ., 1984, 272 p.
  5. Khlyustova A.V., Manakhov A.M., Maksimov A.I., Khorev M.S. Svyaz' elektricheskikh i opticheskikh svoystv plasmennno-rastvornykh sistem [The association of electric and optical properties of plasma-solution systems] *Elektronnaya obrabotka materialov — Surface engineering and applied electrochemistry*, 2009, vol. 45, no. 5, pp. 18 – 23.
  6. Silkin S.V., Parfenyuk V.I. Sravnitel'naya kharakteristika gorenija podvodnogo razryada tipa tortsevogo na peremennom i pul'siruyushchem tokakh [Comparative characteristic of ignition underwater face discharge at alternating and pulsating currents]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Surface engineering and applied electrochemistry*, 2013, vol. 49, no. 1, pp. 86 – 89.
  7. Silkin S.V. Kinetika raspyleniya grafitovogo anoda v podvodnom tortsevom razryade [Kinetic of deposition of graphite anode in underwater face discharge]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya — High education bulletin. Chemistry and chemical technology*, 2013, vol. 56, no. 1, pp. 59 – 62.
  8. Silkin S.V., Parfenyuk V.I. Plasmennno-elektrolitnaya obrabotka grafitovogo elektroda v podvodnom tortsevom razryade [Plasma electrolyte treatment of graphite electrodes in the underwater face discharge]. *Perspektivnie materialy — Advanced materials (in Rus)*, 2014, no. 3, pp. 63 – 66.
  9. Silkin S.V., Maksimov A.I. Otsenka kinetiki dispergirovaniya grafitovogo elektroda v podvodnom tortsevom razryade [Estimate of deposition kinetic of graphite electrode in underwater face discharge]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya — High education bulletin. Chemistry and chemical technology*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 99 – 101.

Статья поступила в редакцию 16.06.2014 г.

**Силкин Сергей Владимирович** — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Ивановской государственной сельскохозяйственной академии имени академика Д.К. Беляева” (г. Иваново), кандидат химических наук, старший преподаватель, специалист в области плазмохимии в плазменно-растворных системах. E-mail: SSV-bunker@rambler.ru.

**Парфенюк Владимир Иванович** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии растворов им. Г. А. Крестова Российской академии наук (г. Иваново), доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник, специалист в области физической химии и электрохимии растворов. E-mail: VIP@isc-ras.ru.

---

## About sound wave influence in destroy of graphite electrode in underwater face discharge

S. V. Silkin, V. I. Parfenyuk

The sound wave influence generating under the action of underwater face discharge in destroy graphite electrode was study. It was show that power of sound waves at different conditions of glowing discharge less than 20 mW and velocity of graphite electrode destroy is  $10^{-5}$  mg/min. Comparison of velocity of graphite electrode destroy under influence of sound waves with other ways him destroy show that the sound wave influence very slightly and them can be ignore versus other ways of the electrode destroy. It is four orders lower than ion bombardment and two orders lower than electrode erosion under the active oxidants. Variation of distance between electrode edge and nozzle not influence fundamentally on nature of the sound wave impact on surface of the electrode in the studied range (0.5 – 2.0 cm).

**Keyboards:** graphite electrode, underwater discharge, deposition, sound wave.

---

**Silkin Sergey** — Belyaev Ivanovo State Agricultural Academy (153467, Ivanovo, Russia, Sovetskaya st., 45), Phd (chem.), senior lecturer, specialist in chemistry of plasma in plasma-solutions systems. E-mail: SSV-bunker@rambler.ru.

**Parfenyuk Vladimir** — Krestov Institute of solution chemistry of RAS (Ivanovo, 153045 Russia, Akademicheskaya St., 1), DrSci (chem.), professor, senior researcher, specialist in physical chemistry and electrochemistry solutions. E-mail: VIP@isc-ras.ru.