

УДК 537.523.9+544.55

Экспериментальное исследование нагрева жидкого катода и переноса его компонентов в газовую фазу под действием разряда постоянного тока*Н. А. Сироткин, В. А. Титов*

Исследован разряд постоянного тока ($i = 10\text{—}50$ мА) в воздухе при атмосферном давлении. В качестве катода или анода разряда использовали раствор хлорида натрия (0,5 моль/л). По зависимостям напряжение горения разряда от межэлектродного расстояния найдены напряженность поля в плазме и катодное (анодное) падение потенциала, температура газа определена по распределению интенсивности в полосе излучения $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-2)$. Получены зависимости температуры жидкого электрода от времени горения разряда и после его выключения, а также скорость испарения раствора под действием разряда. На основе полученных данных обсуждаются вклады ионной бомбардировки и переноса тепла из плазмы в процессы нагрева жидкого электрода и переноса растворителя (воды) в газовую фазу.

PACS: 52.25.Fi

Ключевые слова: плазма, газовый разряд, электролитный катод, процессы переноса, ионная бомбардировка, термическое испарение.

Введение

Газовые разряды, контактирующие с жидкостями, представляют значительный интерес как источники активных частиц для очистки и дезинфекции воды [1—3], модифицирования высокомолекулярных соединений [4—6], нанесения покрытий на различные материалы [7], формирования микро- и наноструктур на основе металлов и их оксидов [8—10]. Ряд исследований нацелен на разработку методов эмиссионно-спектрального определения концентрации ионов металлов в воде [11—13]. Действительно, при возбуждении разряда постоянного тока между металлическим электродом и поверхностью воды или водных растворов происходит перенос в плазму не только молекул растворителя, но и компонентов растворенного вещества [14, 15]. В спектрах излучения плазмы наряду с полосами радикалов ОН и атомов Н регистрируются линии излучения атомов металлов, которые исходно присутствуют в растворах в виде катионов [11—13, 16].

Детальные механизмы переноса компонентов из раствора в плазму не выяснены. Предполагается, что в разряде постоянного тока эти процессы обусловлены ионной бомбардировкой жидкого электролитного катода и подобны классическому катодному распылению [15]. По аналогии с катодным распылением для количественной характеристики переноса частиц из раствора-катода в плазму предложено использовать коэффициент переноса — число частиц, переносимых из раствора в газовую фазу в расчете на один падающий на поверхность раствора ион. Было найдено, что в разрядах постоянного тока при атмосферном давлении коэффициенты переноса для молекул воды составляют 300—500 молекула/ион, а для компонентов растворенных веществ — 0,001—0,1 частица/ион и зависят от концентрации растворов [17, 18].

Естественно, что перенос молекул растворителя может происходить и в результате термического испарения, так как температура газа в плазме составляет от 1000 до 3500 К [19—21]. Кроме того, к нагреву раствора-катода и к его испарению может приводить джоулево тепловыделение при протекании тока в объеме жидкости. Авторы работы [22] исследовали нагрев электролитного катода при изменении тока разряда и потока раствора электролита через разрядную ячейку. Было найдено, что с изменением тока от 2 до 10 А соотношение мощностей ионной бомбардировки катода и джоулевого тепловыделения в растворе изменя-

Сироткин Николай Александрович, научный сотрудник.
Титов Валерий Александрович, главный научный сотрудник.
Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН.
Россия, 153045, Иваново, ул. Академическая, д. 1.
Тел. +7(4932) 33-62-59.
E-mail: titov25@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10 октября 2016 г.

© Сироткин Н. А., Титов В. А., 2016

ется, и при токе более 10 А нагрев электролитного катода обусловлен в основном джоулевым тепловыделением в растворе. В работе [23] на основе измерений температуры потока воздуха на входе в разряд и на выходе из него с одновременной регистрацией кинетики нагревания раствора-катода под действием разряда было найдено, что 20—30 % вложенной в разряд мощности расходуется на нагрев раствора и до 55 % — на неравновесное парообразование.

Цель данной работы заключалась в экспериментальной оценке вкладов ионной бомбардировки и теплопереноса от нагретого газа к жидкому электролитному катоду в его нагрев и в перенос молекул растворителя (воды) в газовую фазу.

Экспериментальная установка и методы измерения

Схема экспериментальной установки и фотографии разряда представлены на рис. 1. Разряд постоянного тока ($i = 10\text{—}50\text{ мА}$) возбуждали при атмосферном давлении между поверхностью раствора и стержневым медным электродом диаметром 2 мм, который размещался в воздухе над раствором. В разных экспериментах медный электрод использовался как катод или анод разрядной ячейки. В качестве жидкого электрода использовали раствор хлорида натрия с концентрацией 0,5 моль/л, объем раствора составлял 110 мл. Раствор перемешивали с помощью магнитной мешалки, его температуру измеряли термопарой ТХА в комплекте с цифровым мультиметром «РЕСАНТА DT9208А». Случайные погрешности значений температуры находили по результатам 3–5 измерений при доверительной вероятности 0,9.

По фотографиям разряда определяли диаметры положительного столба и приэлектродных областей, с использованием которых находили плотность тока в положительном столбе, а также в катодной и анодной областях разряда. Скорость убыли массы раствора в результате переноса компонентов в газовую фазу при горении разряда определяли путем непрерывного взвешивания ячейки на электронных весах с точностью до 0,01 г. Схема установки для гравиметрических измерений описана в работе [24].

Спектры излучения разряда в интервале $\lambda = 200\text{—}950\text{ нм}$ регистрировали спектрометром AvaSpec-2048 с дифракционной решеткой 600 штрихов/мм. Температуру газа находили по распределению интенсивности в полосе излучения, отвечающей электронно-колебательному переходу $\text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u \rightarrow \text{B}^3\Pi_g, 0\text{--}2)$, по методике, описанной в [25]. Для оценки воспроизводимости результатов выполняли по 5 независимых измере-

ний, границы доверительных интервалов рассчитывали с доверительной вероятностью 0,9.

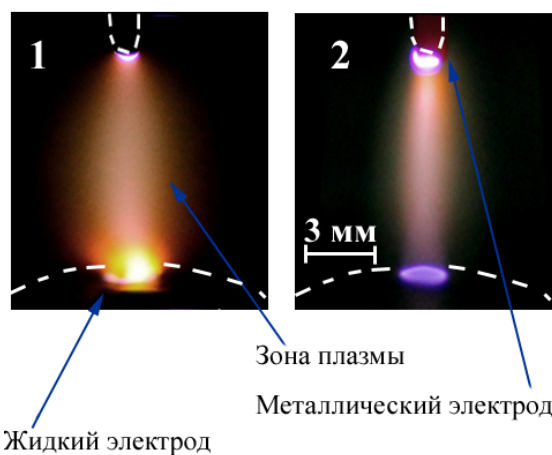
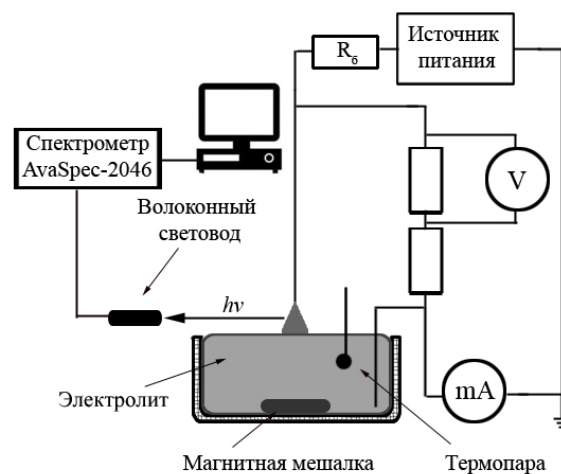


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и внешний вид разряда атмосферного давления с жидким электролитным катодом (1) и с жидким электролитным анодом (2) при токе разряда $i = 50\text{ мА}$.

Измеряли также напряжение горения разряда в зависимости от межэлектродного расстояния. Длину разрядного промежутка (h) изменяли от 0,5 до 2,5 мм вертикальным перемещением металлического электрода с шагом 0,5 мм и точностью отсчета положения $\pm 0,002\text{ мм}$. Полученные данные аппроксимировались линейной функцией с коэффициентом парной корреляции не ниже 0,99 (рис. 2). Напряженность поля в плазме ($E = dU/dh$) определяли как угловой коэффициент зависимости $U = f(h)$, а ее экстраполяцией к значению U_0 при $h \rightarrow 0$ находили сумму приэлектродных падений потенциала у поверхности катода (U_C) и анода (U_A), а также падения потенциала в растворе (U_S): $U_0 = U_C + U_A + U_S$. Величину U_S измеряли в отдельных экспериментах при касании металлическим электродом поверхности раствора и пропускании тока, равного току разряда. Результаты измерений представлены в табл. 1.

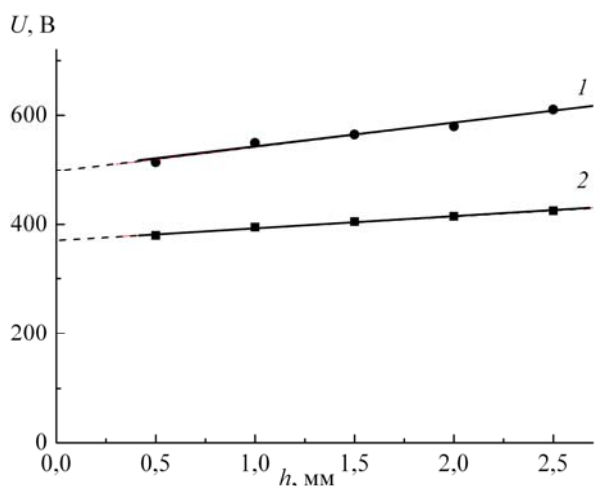


Рис. 2. Зависимость напряжения горения разряда от межэлектродного расстояния при $i = 50$ мА: 1 — разряд с электролитным катодом и анодом из меди, 2 — разряд с двумя электродами из меди.

В случае разряда с жидким электролитным катодом и анодом из меди $U_C \gg U_A$. Однако в разряде с электролитным анодом нельзя пренебрегать падением потенциала у поверхности металлического катода. Поэтому измерения, аналогичные описанным выше, были выполнены при зажигании разряда атмосферного давления с двумя электродами из меди. На рис. 2 приведена зависимость напряжения горения разряда между двумя электродами из меди от межэлектродного зазора при токе 50 мА (прямая 2). Найденное по этим данным катодное падение потенциала $U_{C(Cu)} = 371 \pm 2$ В практически совпадает с нормальным катодным падением для тлеющего разряда с медным катодом в воздухе (370 В) [26]. При токе разряда 30 мА было получено близкое значение

$U_{C(Cu)} = 367 \pm 3$ В. Анодное падение потенциала в разряде с жидким электролитным анодом и медным катодом находили по формуле $U_A = U_0 - U_{C(Cu)} - U_S$.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены экспериментальные значения физических характеристик разряда постоянного тока при использовании раствора хлорида натрия в качестве катода или анода. Падение потенциала у поверхности жидкого анода составляет 50—70 В, катодное падение потенциала примерно в десять раз выше. Величины U_C и U_A слабо зависят от тока разряда, что согласуется с данными работ [15, 27, 28]. Вращательная температура $N_2(C^3\Pi_u, V = 0)$, которую можно отождествлять с температурой газа, составляет ~ 1600 К и в пределах погрешности совпадает для разрядов с жидким электролитным катодом или анодом. Последнее позволяет предположить, что обусловленный градиентом температуры поток тепла из плазмы на поверхность раствора примерно одинаков при любой полярности жидкого электрода. Для сравнения отметим, что в разряде с двумя медными электродами напряженность поля составляет 630 ± 60 В/см и 550 ± 50 В/см, а температура газа 1420 ± 60 К и 1400 ± 70 К при токах разряда 30 и 50 мА соответственно.

На рис. 3 представлены типичные зависимости изменения средней температуры раствора ($T - T_0$) при горении разряда и после его выключения. Во всех экспериментах начальная температура $T_0 = 293$ К, стационарные значения температуры при горении разряда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические параметры разряда с жидким электролитным электродом

Параметр	Разряд с электролитным катодом			Разряд с электролитным анодом		
	30	40	50	30	40	50
Ток разряда, мА	30	40	50	30	40	50
Падение напряжения катодное (анодное), В	515 ± 10	508 ± 10	502 ± 10	70 ± 5	65 ± 15	50 ± 10
Напряженность поля в плазме, В/см	970 ± 60	795 ± 50	720 ± 65	1050 ± 60	1100 ± 50	1140 ± 65
Плотность тока, в катодной (анодной) области, А/см ²	1,19 ± 0,07	1,21 ± 0,09	1,18 ± 0,08	1,10 ± 0,05	1,05 ± 0,11	1,05 ± 0,15
Температура газа, К	1660 ± 70	1640 ± 60	1620 ± 70	1590 ± 70	1580 ± 60	1590 ± 100
Температура жидкого электрода, К	305 ± 2	310 ± 2	316 ± 2	297 ± 1	300 ± 1	302 ± 2
Падение напряжения в растворе, В	5 ± 1	8 ± 1	9 ± 2	6 ± 1	8 ± 1	10 ± 2

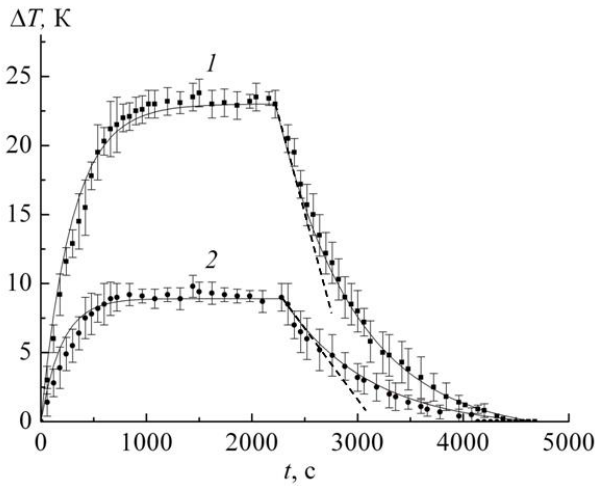


Рис. 3. Зависимости изменения температуры электрода-раствора от времени при горении разряда и после его выключения: 1 — раствор-катод, 2 — раствор-анод, $i = 50$ мА.

На основе экспериментальных зависимостей температуры раствора от времени были сделаны оценки мощности источников, нагревающих жидкий электрод, с использованием подхода, изложенного в [29]. Зависимость температуры от времени является решением уравнения теплового баланса:

$$cm(dT/dt) = \Sigma P_i - \Sigma P_j,$$

где c — удельная теплоемкость раствора, m — его масса, ΣP_i — мощность тепловых источников, нагревающих раствор, ΣP_j — мощность тепловых стоков.

Мощность тепловых стоков была найдена по начальной скорости охлаждения электрода-раствора (по угловым коэффициентам пунктирных прямых на рис. 3) после выключения разряда: $cm(dT/dt) = -\Sigma P_j$. В свою очередь, в условиях стационарной температуры раствора при горении разряда ($dT/dt = 0$) мощность тепловых источников равна мощности стоков ($\Sigma P_i = \Sigma P_j$).

Тепловые источники включают в себя поток тепла от нагретого в плазме газа к раствору (P_T), джоулево тепловыделение в растворе (P_s) и перенос энергии бомбардирующими жидкий электрод заряженными частицами (P_q): $\Sigma P_i = P_T + P_s + P_q$. Мощность джоулевого тепловыделения в растворе $P_s = iU_s$ много меньше остальных составляющих: при токе разряда 30 и 50 мА она равна 0,15 и 0,45 Вт, соответственно, в то время как значения $P_q = iU_c$ составляют 15,45 и 25,10 Вт при тех же токах разряда.

С использованием найденных значений ΣP_i при разряде с жидким катодом или анодом можно оценить вклады в нагрев жидкого электрода процессов теплопереноса от нагретого в плазме газа (P_T) и бомбардировки заряженными частицами

(P_q) в предположении, что при любой полярности жидкого электрода мощность, обусловленная переносом тепла из плазмы, одинакова. Естественно предположить также, что при $i = \text{const}$ соотношение значений мощности, переходящей в тепло при бомбардировке жидкого катода положительными ионами (P_+) или анода электронами и отрицательными ионами (P_-), определяется величинами катодного и анодного падений потенциала: $P_+/P_- = U_c/U_A = \alpha$. С учетом сделанных допущений получим систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} \Sigma P_{iA} = P_T + P_- \\ \Sigma P_{iC} = P_T + \alpha P_- \end{cases},$$

где ΣP_{iA} и ΣP_{iC} — экспериментальные значения мощности источников нагрева жидкого анода и катода, соответственно. Результаты решения этой системы уравнений для двух режимов горения разряда приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценок мощности (P , Вт) нагрева жидкого электролитного электрода под действием разряда

i , мА	Разряд с электролитным катодом			Разряд с электролитным анодом		
	ΣP_{iC}	P_T	P_+	ΣP_{iA}	P_T	P_-
30	9,772	2,741	7,031	3,696	2,741	0,955
50	10,269	3,287	6,982	3,983	3,287	0,696

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что основной вклад в нагрев электролитного катода вносит ионная бомбардировка, поток тепла из плазмы дает не более 30 % мощности, расходуемой на нагрев. В то же время в разряде с электролитным анодом мощность, обусловленная потоком тепла от нагретого в плазме газа, значительно превышает мощность бомбардировки жидкого электрода заряженными частицами.

Ионная бомбардировка жидкого катода приводит не только к его нагреву, но и к переносу в газовую фазу растворителя и компонентов растворенного вещества. Оценить вклад квазиравновесного термического испарения в перенос растворителя при горении разряда можно несколькими способами. Во-первых, была измерена скорость испарения раствора-катода в зависимости от тока разряда и полученная зависимость экстраполирована к нулевому току (рис. 4). При этом предполагалось, что при $i \rightarrow 0$ ионной бомбардировкой раствора-катода можно пренебречь, но поток тепла от нагретого газа тот же, что и при других режимах горения разряда (из-за слабой зависимости температуры газа от тока). Представленные на рис. 4 экспериментальные данные хорошо аппроксимируются эмпирической формулой $w = 1,087 \times$

$\times 10^{-5} + 3,62 \times 10^{-6}i + 8,175 \times 10^{-8}i^2$. Оцененная таким способом величина скорости квазиравновесного испарения ($1,087 \times 10^{-5}$ г/с) не превышает 20 % от экспериментальных значений скорости убыли массы раствора при минимальном в наших экспериментах токе разряда 10 мА.

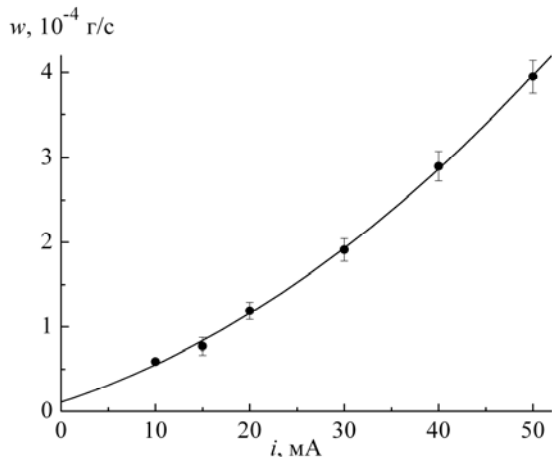


Рис. 4. Зависимость скорости испарения раствора-катода от тока разряда: точки — эксперимент, линия — результат аппроксимации эмпирической формулой $w = a + bi + ci^2$.

Второй способ оценки основан на предположении, что вся энергия, приобретаемая заряженными частицами в приэлектродных областях разряда (у поверхности жидкого катода или анода), расходуется на квазиравновесное испарение. Тогда скорость испарения можно рассчитать как $w = iU/H_v$, где U — катодное (или анодное) падение потенциала, H_v — удельная теплота парообразования для воды. Результаты оценок вместе со скоростями убыли массы раствора, измеренными при различной полярности жидкого электрода, приведены в табл. 3. Эти данные показывают, что скорость неравновесного парообразования из раствора-катода почти на порядок выше, чем из раствора-анода. Это является еще одним подтверждением того, что поток тепла из плазмы не играет решающей роли в переносе растворителя из жидкого катода в газовую фазу. Кроме того, расчет скорости термического испарения за счет энергии, переносимой положительными ионами, дает значения примерно в 5 раз ниже экспериментальных. При использовании раствора в качестве анода экспериментальные результаты ближе к расчетным.

Таблица 3

Скорости испарения воды (w) под действием разряда с жидким электролитным электродом

i , мА	w , 10^{-4} г/с			
	Разряд с электролитным катодом		Разряд с электролитным анодом	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
30	2,09±0,08	0,46	0,23±0,05	0,18
50	3,91±0,09	0,81	0,44±0,07	0,32

Заключение

Проведенные исследования показали, что основной вклад в перенос растворителя (воды) из электролитного катода в газовую фазу вносит ионная бомбардировка, а не поток тепла из плазмы, причем процесс переноса подобен катодному распылению. Высокие значения коэффициентов переноса и наличие в газовой фазе компонентов растворенного вещества позволяют предположить, что, по крайней мере, частично перенос воды осуществляется в виде кластеров и микрокапелек, содержащих в своем составе ионы (или ионные пары) растворенных веществ. Это подтверждается и результатами моделирования ионного распыления воды и раствора хлорида натрия методом классической молекулярной динамики [30, 31].

ЛИТЕРАТУРА

- Jiang Bo, Zheng J., Qiu S., Wu M., Zhang Q., Yan Z., Xue Q. // Chem. Eng. J. 2012. Vol. 236. P. 348.
- Du C. M., Wang J., Zhang L., Li H. X., Liu H., Xiong Y. // New J. Phys. 2012. Vol. 14. No.1. P. 5.
- Yang Y, Cho Y.I., Fridman A. Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications. — New York: CRC Press, 2012.
- Titov V. A., Shikova T. G., Rybkin V. V., Ageeva T. A., Choi H. S. // High Temp. Mater. Process. 2006. Vol. 10. No. 3. P. 467.
- Choi H. S., Shikova T. G., Titov V. A., Rybkin V. V. // J. Coll. Interface Sci. 2006. Vol. 300. No.2. P. 640.
- Titov V. A., Rybkin V. V., Shikova T. G., Ageeva T. A., Golubchikov O. A., Choi H. S. // Surf. Coat. Technol. 2005. Vol. 199. No. 2. P. 231.
- Suzuki T., Matsushima Y., Mori Y., Yamazaki T., Noma T. // J. Mater. Sci. 2002. Vol. 37. P. 595.
- Mariotti D., Sankaran R.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43, No.32. P. 323001.
- Saito G., Akiyama T. // J. Nanomat. 2015. Vol. 2015. P. 123696.
- Takai O. // Pure Appl. Chem. 2008. Vol. 80. No. 9. P. 2003.
- Webb M. R., Andrade F. J., Gamez G., McCrindle R., Hiefje G. M. // J. Anal. At. Spectrom. 2005. Vol. 20. No. 11. P. 1218.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-33-60061 мол_а_дк).

12. Mezei P., Cserfalvi T. // Appl. Spectr. Rev. 2007. Vol. 42. No. 6. P. 573.
13. Bencs L., Laczai N., Mezei P., Cserfalvi T. // Spectrochim. Acta, Part B. 2015. Vol. 107. P. 139.
14. Максимов А. И., Хлюстова А. В. // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43. № 3. С. 195.
15. Titov V. A., Rybkin V. V., Maximov A. I., Choi H.-S. // Plasma Chem. Plasma Process. 2005. Vol. 25. No. 2. P. 503.
16. Максимов А. И., Титов В. А., Хлюстова А. В. // Химия высоких энергий. 2004. Т. 38. № 3. С. 227.
17. Хлюстова А. В., Сироткин Н. А., Максимов А. И. // Химия высоких энергий. 2010. Т. 44. № 1. С. 75.
18. Кутенов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И., Титов В. А. // Химия высоких энергий. 2003. Т. 35. № 5. С. 362.
19. Mezei P., Cserfalvi T. // Sensors. 2012. Vol. 12. No. 5. P. 6576.
20. Webb M. R., Andrade F. J., Hieftje G. M. // J. Anal. At. Spectrom. 2007. Vol. 22. No. 7. P. 766.
21. André P., Barinov Y., Faure G., Kaplan V., Lefort A., Shkol'Nik S., Vacher D. // J. Phys. D Appl. Phys. 2001. Vol. 34. No. 24. P. 3456.
22. Тазмеев Г. Х., Тимеркаев Б. А., Тазмеев Х. К., Арсланов И. М. // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 72.
23. Janca S., Kuzmin A., Maximov A., Titova J., Czernichowski A. // Plasma Chem. Plasma Proc. 1999. Vol. 19. No. 1. P. 53.
24. Khyustova A. V., Dydykin M. G., Maksimov A. I., Polyakov M. S. // Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2008. Vol. 44. No. 5. P. 370.
25. Titov V. A., Rybkin V. V., Smirnov S. A., Kulentsan A. L., Choi H.-S. // Plasma Chem. Plasma Proc. 2006. Vol. 26. No. 6. P. 543.
26. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009.
27. Hickling A., Ingram M. D. // J. Electroanal. Chem. 1964. Vol. 8. No. 1. P. 65.
28. Verreycken T., Schram D. C., Leys C., Bruggeman P. // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. No. 4. P. 045004
29. Магунов А. Н. Теплообмен неравновесной плазмы с поверхностью. — М.: Физматлит, 2005.
30. Nikiforov A. Yu. // High Energy Chem. 2008. Vol. 42. No. 3. P. 235.
31. Титов В. А., Сироткин Н. А. / VII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (3–7 сентября 2014 г., Плёс, Россия): сборник трудов / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. — Иваново, 2014. С. 160.

Experimental study of the liquid cathode heating and transfer of its components to a gas phase under action of a direct current discharge

N. A. Sirotkin and V. A. Titov

G. A. Krestov Institute of Solution Chemistry, RAS
1, Akademicheskaja st., Ivanovo, 153045, Russia
E-mail: titov25@gmail.com

Received October 10, 2016

The atmospheric pressure air direct current discharge ($i = 10\text{--}50\text{ mA}$) with metal and liquid electrolyte electrodes has been studied. An aqueous solution of sodium chloride (0.5 mole/l) was used as a cathode or anode. An electric field strength in plasma and cathode (anode) voltage drops were obtained from dependences of the discharge voltage on the electrode gap. The gas temperature was deduced from the intensity distribution in the nitrogen emission band $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-2)$. Dependences of liquid electrolyte electrode temperatures on time at the discharge action and after discharge shutdown as well as a rate of solution evaporation were experimentally measured. Contributions to the heating of liquid electrode and to transfer of solvent (water) into gas phase, originated from ion bombardment and heat transfer from plasma, are discussed on the base of obtained experimental data.

PACS: 52.25.Fi

Keywords: plasma, gas discharge, electrolyte cathode, transfer processes, ion bombardment, thermal evaporation.

REFERENCES

1. Bo Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Q. Zhang, Z. Yan, and Q. Xue, Chem. Eng. J. **236**, 348. (2012).
2. C. M. Du, J. Wang, L. Zhang, H. X. Li, H. Liu, and Xiong Y, New J. Phys. **14**, 5 (2012).
3. Y. Yang, Y. I. Cho, A. Fridman, *Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications* (New York, CRC Press, 2012).
4. V. A. Titov, T. G. Shikova, V. V. Rybkin, T. A. Ageeva, and H. S. Choi, High Temp. Mater. Process. **10**, 467 (2006).
5. H. S. Choi, T. G. Shikova, V. A. Titov, and V. V. Rybkin, J. Coll. Interface Sci. **300**, 640 (2006).

6. V. A. Titov, V. V. Rybkin, T. G. Shikova, T. A. Ageeva, O. A. Golubchikov, and H. S. Choi, *Surf. Coat. Technol.* **199**, 231 (2005).
7. T. Suzuki, Y. Matsushima, Y. Mori, T. Yamazaki, and T. Noma, *J. Mater. Sci.* **37**, 595 (2002).
8. D. Mariotti, R.M. Sankaran, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 323001 (2010).
9. G. Saito, T. Akiyama, *J. Nanomat.* **2015**, 123696 (2015).
10. O. Takai, *Pure Appl. Chem.* **80**, 2003 (2008).
11. M. R. Webb, F. J. Andrade, G. Gamez, R. McCrindle, and G.M. Hieftje, *J. Anal. At. Spectrom.* **20**, 1218 (2005).
12. P. Mezei, T. Cserfalvi, *Appl. Spectr. Rev.* **42**, 573 (2007).
13. L. Bencs, N. Laczai, P. Mezei, and T. Cserfalvi, *Spectrochim. Acta, Part B.* **107**, 139 (2015).
14. A. I. Maksimov, A. V. Khlyustova, *High Energy Chem.* **43**, 149 (2009).
15. V. A. Titov, V. V. Rybkin, A. I. Maximov, and H.-S. Choi, *Plasma Chem. Plasma Process.* **25**, 503 (2005).
16. A. I. Maksimov, V. A. Titov, and A. V. Khlyustova, *High Energy Chem.* **38**, 196 (2004).
17. A. V. Khlyustova, N. A. Sirotkin, and A. I. Maximov, *High Energy Chem.* **44**, 75 (2010).
18. A. M. Kutepov, A. G. Zakharov, A. I. Maksimov, and V. A. Titov, *High Energy Chem.* **23**, 362 (2003).
19. P. Mezei, T. Cserfalvi, *Sensors* **12**, 6576 (2012).
20. M. R. Webb, F. J. Andrade, G. M. J. Hieftje, *Anal. At. Spectrom.* **22**, 766 (2007).
21. P. André, Y. Barinov, G. Faure, V. Kaplan, A. Lefort, S. Shkol'Nik, and D. Vacher, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34**, 3456 (2001).
22. G. Kh. Tazmeev, B. A. Timerkaev, Kh. K. Tazmeev, and I. M. Arslanov, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 72 (2016).
23. S. Janca, A. Kuzmin, A. Maximov, J. Titova, and A. Czernichowski, *Plasma Chem. Plasma Proc.* **19**, 53 (1999).
24. A. V. Khlyustova, M. G. Dydykin, A. I. Maksimov, and M. S. Polyakov, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **44**, 370 (2008).
25. V. A. Titov, V. V. Rybkin, S. A. Smirnov, A. L. Kulentsan, and H.-S. Choi, *Plasma Chem. Plasma Proc.* **26**, 543 (2006).
26. Yu.P. Rayzer, *Physics of the gas discharge* (Dolgoprudni, Intellect, 2009) [in Russian].
27. A. Hickling, M. D. Ingram, *J. Electroanal. Chem.* **8**, 65 (1964).
28. T. Verreycken, D.C. Schram, C. Leys, P. Bruggeman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 045004 (2010).
29. A. N. Magunov, *Heat exchange of non-equilibrium plasma with surface* (Moscow, Fizmathlit, 2005) [in Russian].
30. A. Yu. Nikiforov, *High Energy Chem.* **42**, 235 (2008).
31. V. A. Titov, N. A. Sirotkin in *Proc. VII International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry* (September 3–7, 2014. Plios, Russia). Published by Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia, 2014, P. 160–163.