

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НАД ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ АНИОНАКТИВНЫХ И КАТИОНАКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Д.А. Шутов, А.Н. Иванов, В.В. Рыбкин, А.С. Манукян

Дмитрий Александрович Шутов, Александр Николаевич Иванов, Владимир Владимирович Рыбкин, Анна Славиковна Манукян

Кафедра технологии приборов и материалов электронной техники, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000  
E-mail: shutov@isuct.ru

*В работе приводятся результаты экспериментальных исследований электрофизических характеристик разрядов, горящих в атмосфере воздуха при нормальных условиях между медным игольчатым анодом и водными растворами катионактивного поверхностно-активного вещества (ПАВ) октодецил триметил хлорида аммония ( $C_{12}H_{46}ClN$ , ОХА, АОТС) и анионактивного ПАВ лаурилсульфат натрия ( $C_{12}H_{25}SO_4Na$ , ЛСН, SLS). Приводится сравнение полученных данных с известными результатами для разрядов схожего типа, горящих над дистиллированной водой и растворами других органических соединений. В диапазоне концентраций  $5 \cdot 10^{-3}$ -10 г/л и тока разряда 20-100 мА изучена феноменология горения разряда, определены плотности тока и мощности, вкладываемые в разряд, катодные падения потенциала, колебательная температура молекул  $N_2(C^3\Pi)$ , газовые температуры, рассчитаны приведенные напряженности электрического поля. Показано, что рост концентрации ЛСН в растворе сопровождается изменением окраски разряда, вследствие переноса в газовую фазу из раствора атомов Na, в то время как для ОХА появления в спектре излучения новых линий или полос излучения не наблюдается. Установлено, что катодные падения потенциала для разряда над катионактивным ПАВ систематически ниже, чем над анионактивным. Температуры нейтральной компоненты и колебательные в пределах погрешности эксперимента не зависят от типа раствора. Приведенные напряженности электрического поля лежат в диапазоне 10-15 Тд, падают с ростом концентрации раствора, растут с увеличением тока разряда, и не зависят от типа ПАВ в растворе.*

**Ключевые слова:** плазма, газовый разряд, физические параметры, жидкий катод, анионактивные ПАВ, катионактивные ПАВ

## COMPARATIVE STUDY OF ELECTRICAL AND PHYSICAL PARAMETERS OF GLOW DISCHARGE UNDER WATER SOLUTIONS OF ANIONIC AND CATIONIC SURFACTANTS

D.A. Shutov, A.N. Ivanov, V.V. Rybkin, A.S. Manukyan

Dmitriy A. Shutov, Aleksandr N. Ivanov, Vladimir V. Rybkin, Anna S. Manukyan

Department of Electronic Devices and Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: shutov@isuct.ru

*The results of experimental study of the electrical and physical parameter of the gas discharge in air under the solutions of the two types of surfactants are given. The discharge was ignited between metal needle anode and liquid cathode. As the cathode the solutions of anionic surfactant  $C_{12}H_{25}SO_4Na$  (SLS) and cationic surfactant  $C_{12}H_{46}ClN$ , (AOTC) were used. In the concentration range of  $5 \cdot 10^{-3}$ -10 g/L and discharge current range of 20-100 mA the phenomenology of discharge was studied, the current densities and inputted power, cathode voltage drops, vibrational temperatures of  $N_2(C^3\Pi)$ , gas temperatures were obtained and reduced electric field strength was*

*calculated. It was show that increase of the SLS concentration leads to the change in the discharge color due to transfer of Na atoms from liquid to the gas phase. In the same time there are no any new emission lines or band for the AOTC solutions were obtained. It was established that for cationic surfactants the cathode voltage drop is lower than for anionic surfactant. The gas temperatures and vibrational temperatures don't depend on solution type. Reduced electric field is in the range of 10-15 Td and the increase of the concentration leads to decrease of the E/N. The increase of the discharge current results in the growth of reduced electric field.*

**Key words:** plasma, gas discharge, physical parameters, liquid cathode, anionic surfactants, cationic surfactants

**Для цитирования:**

Шутов Д.А., Иванов А.Н., Рыбкин В.В., Манукян А.С. Сравнительное изучение электрофизических характеристик тлеющего разряда над водными растворами анионоактивных и катионоактивных поверхностно-активных веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 91–98

**For citation:**

Shutov D.A., Ivanov A.N., Rybkin V.V., Manukyan A.S. Comparative study of electrical and physical parameters of glow discharge under water solutions of anionic and cationic surfactants. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 2. P. 91–98

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня интенсивно развивается направление исследований, связанное с изучением процессов очистки воды, загрязненной различного рода химическими соединениями, под действием плазмы электрических разрядов. Известно значительное количество систем возбуждения разряда, отличающихся как способами генерации непосредственно плазмы, так и вариантами её взаимодействия с жидкой фазой [1-3]. Пожалуй, наиболее простой, с точки зрения технической реализации, является система, когда разряд возбуждается между игольчатым электродом, находящимся в газовой фазе, и поверхностью раствора [4]. Ранее нами была показана эффективность применения такого разряда для деструкции ряда органических соединений [5, 6].

Если речь идет о целевом процессе деструкции поллютантов в жидкой фазе, исследователей в первую очередь интересуют непосредственно кинетика разрушения соединений и образования продуктов плазмохимической деструкции. Основная масса работ носит прикладной характер, когда при некоторых, задаваемых зачастую произвольно, внешних параметрах разряда, изучается изменение концентрации типовых загрязнителей, например, фенола и его производных [7, 8], поверхностно-активных веществ (ПАВ) [9], красителей [10, 11]. Но понимание и прогнозирование процессов, протекающих в жидкой фазе, невозможно в полной мере без анализа процессов, и механизмов процессов, имеющих место непосредственно в плазме, которая, собственно, и ответственна за конечный эффект. Такой анализ, в свою очередь, предполагает

экспериментальное получение целого набора электрофизических, энергетических и оптических характеристик разряда, которые являются как входными параметрами при моделировании плазмы, так и критериями адекватности модели [12-15].

Целью данной работы было исследование, в широком диапазоне концентраций и параметров разряда, электрофизических и энергетических характеристик плазмы разряда постоянного тока, горящего над водными растворами двух ПАВ – катионоактивного и анионоактивного. При выборе объектов исследования учитывалось то, что различное химическое строение ПАВ может приводить к различному влиянию на характеристики разряда вследствие различия в компонентах, переносимых им из раствора в зону плазмы. Кроме того, и октодецилтриметиламмоний хлорид, и лаурилсульфат натрия находят широкое применение в современной промышленности [16], что делает задачу исследования актуальной с точки зрения применения полученных результатов при моделировании процессов деструкции указанных веществ в системе плазма-раствор.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Разряд зажигался в промежутке  $d$ , сверху над которым находится анод, представляющий из себя заостренную к концу медную проволоку диаметром  $1,25 \cdot 10^{-3}$  м (ГОСТ 26615-85 Тип 1), а снизу, соответственно, катод, представляющий из себя стеклянную емкость с рабочим раствором и опущенным в нее медным электродом. Параллельно электродам через делитель напряжения с полным сопротивлением  $R=51,4$  МОм (величина сопротивления резистора, на котором измерялось

падение напряжения, составляла  $R=40,4$  кОм, что значительно меньше входного сопротивления измерительного вольтметра в несколько МОм) подключался прецизионный цифровой мультиметр Fluke 289c (Fluke Corporation, USA), включенный в режим измерения напряжения. Ток в цепи определялся стрелочным миллиамперметром. Эксперименты проводились при токе разряда  $I=20-100$  мА, в атмосфере окружающего воздуха, при давлении  $P=105$  Па. В качестве жидкого катода использовали водные растворы катиоактивного ПАВ октодецилтриметиламмоний хлорида ( $C_{12}H_{25}ClN$ ) и аниоактивного ПАВ лаурилсульфата натрия ( $C_{12}H_{25}SO_4Na$ ). Объем раствора составлял  $0,08$  л. Диапазон исследованных концентраций  $C$  составлял  $5 \cdot 10^{-3}-10$  г/л. Расстояние между электродом и поверхностью раствора  $d=5 \cdot 10^{-3}$  м.

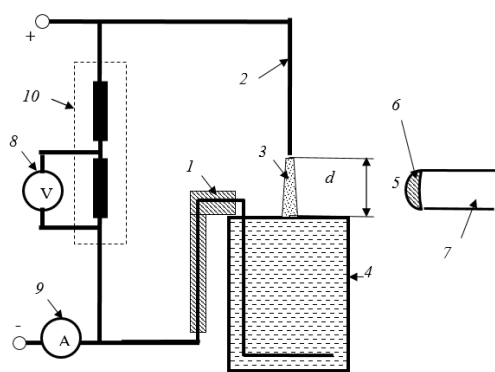


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – катод; 2 – анод; 3 – разряд; 4 – ячейка с раствором; 5 – поток излучения на линзу монохроматора; 6 – коллимирующая линза; 7 – оптоволокно; 8 – вольтметр; 9 – амперметр; 10 – делитель напряжения  
 Fig. 1. Experimental set-up. 1 – cathode; 2 – anode; 3 – discharge; 4 – solution; 5 – the flow of radiation by a lens monochromator; 6 – collimating lens; 7 – optical fiber; 8 – voltmeter; 9 – ammeter; 10 – voltage divider

Определение напряженности электрического поля  $E$  в положительном столбе разряда, и катодного падения потенциала  $U_c$ , проводилось методом передвижного анода. С помощью автоматической системы перемещения анода изменялось межэлектродное расстояние и регистрировалось суммарное падение потенциала на разрядном промежутке и растворе, а затем измерялось падение потенциала на столбе раствора. Разница этих двух величин составляет падение потенциала на самом разрядном промежутке. Полученные значения напряжения на разрядном промежутке при различных межэлектродных расстояниях  $U=f(d)$  линейно аппроксимируются с коэффициентом парной корреляции не хуже  $0,98$ . Угловой коэффициент данной зависимости дает напряженность электрического поля в положительном столбе разряда, а ее

экстраполяция к значению  $d=0$  дает величину катодного падения потенциала.

В силу того, что плазма не ограничена стенками разрядной камеры, для нахождения плотностей тока  $j$  в положительном столбе разряда и в его катодной привязке необходимо знать реальные геометрические размеры разряда. Для этого проводилась видеорегистрация разряда на камеру со скоростью записи  $60$  кадров/с. После разложения видеозаписи на кадры определялись диаметры положительного столба разряда и катодных пятен.

Спектры излучения разряда в интервале длин волн  $200-900$  нм регистрировали с помощью монохроматора спектрометра Avaspec-2048 с дифракционной решеткой  $600$  штрихов/мм, ширина входной щели –  $50$  мкм. Реальная разрешающая способность прибора составляла  $1,3$  нм. Из результатов спектральных измерений находили значения эффективной колебательной температуры  $T_v$ , которые характеризуют заселенности нижних колебательных уровней молекул  $N_2(C^3\Pi_u)$ . Для этого измеряли относительные интенсивности электронно-колебательных полос переходов  $C^3\Pi_{u,v'} \rightarrow V^3\Pi_{g,v'}$ , обратный угловой коэффициент логарифмической зависимости которых (с учетом вероятности соответствующего оптического перехода), от энергии уровня с колебательным квантовым числом  $V'$ , дает искомую колебательную температуру.

Для определения температуры газа определяли вращательную температуру колебательно-возбужденных молекул азота в состоянии  $N_2(C^3\Pi_u)$ , которая при атмосферном давлении равна газовой температуре  $T_g$  [3]. Спектры излучения разряда, используемые далее для определения вращательной температуры, регистрировали с помощью монохроматора спектрометра Avaspec-3648 с дифракционной решеткой  $1200$  штрихов/мм, ширина входной щели –  $10$  мкм. Реальное разрешение прибора в диапазоне длин волн  $250-400$  нм составляет  $\sim 0,17$  нм.

Вращательная температура  $N_2(C^3\Pi_u)$  определялась путем аппроксимации полученных экспериментально, частично разрешенных по вращательной структуре, спектров второй секвенции второй положительной системы  $N_2$ , модельными расчетами. Для построения модельного спектра использовались программное обеспечение [17] и молекулярные константы из [18].

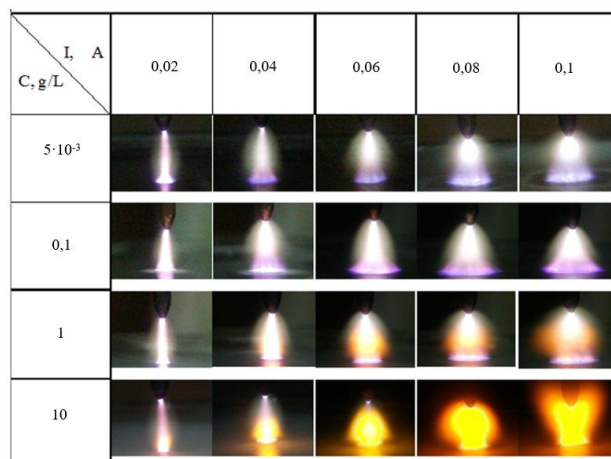
При всех экспериментальных условиях выполняли не менее  $5$  независимых опытов для оценки воспроизводимости результатов. Расчеты случайных погрешностей проводили с доверительной вероятностью  $0,95$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

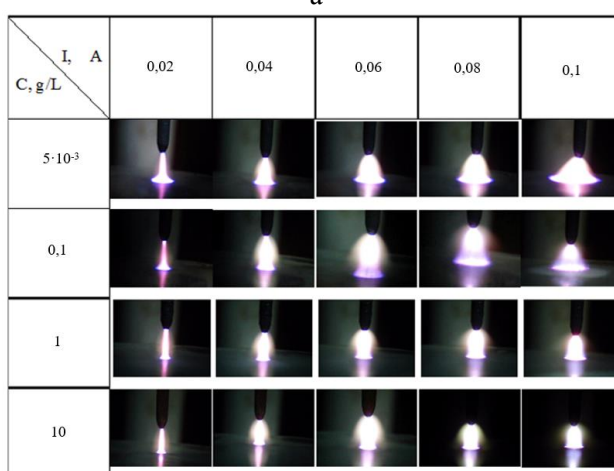
Изменение как параметров разряда, так и концентрации раствора приводит к заметному изменению внешнего вида разряда (рис. 2). Рост тока разряда сопровождается увеличением площадей как катодного пятна, так и положительного столба. В то же время увеличение концентрации раствора при фиксированном токе разряда приводит к небольшому уменьшению радиальных размеров разряда. Очевидно, что для поддержания большего тока при фиксированном значении концентрации увеличение радиуса разряда происходит из соображений увеличения площади, с которой происходит эмиссия электронов в разряд. Т.е. разряд ведет себя подобно нормальному тлеющему. С ростом концентрации раствора все большая удельная его поверхность заполняется поверхностно-активным веществом. И если для слабо концентрированных растворов можно говорить о том, что поверхностью катода является вода, то в концентрированных ею служат, в значительной мере, молекулы ПАВ. Вероятно, это приводит к изменению условий эмиссии из катода в сторону её увеличения, что и позволяет разряду уменьшать свой радиальный размер.

Об изменениях условий эмиссии свидетельствует, в частности, то, что в случае раствора ЛСН рост тока и концентрации раствора приводит к изменению цвета разряда, который приобретает оранжевый оттенок. Это вызвано появлением в плазме атомов Na, что подтверждается данными спектральных измерений. В спектре излучения, помимо обычных для рассматриваемого типа разряда полос излучения NO ( $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ ), OH ( $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ ),  $N_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ,  $B^3\Pi_g \rightarrow A_3\Sigma_u^+$ ), линий излучения атомарного водорода ( $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ) и кислорода (777, 845 и 926,6 нм), появляется линия излучения Na ( $^2P \rightarrow ^2S$ ) при длине волны 589 нм. Отметим, что в случае растворов ОХА увеличение тока и концентрации не сопровождается изменением цвета разряда и не вызывает появления в спектре его излучения новых линий или полос.

На рис. 3(а) и 3(б) приведены плотности тока в положительном столбе разряда над растворами ЛСН и ОХА, соответственно. Слабое изменение плотности тока с ростом тока разряда вызвано тем, что увеличение тока разряда в значительной мере компенсируется увеличением его радиальных размеров. Этим же объясняется и снижение плотности тока с уменьшением концентрации растворов. В целом, по величине, значения плотностей тока близки к полученным ранее для разряда над раствором другого ПАВ, сульфанола [19-21].



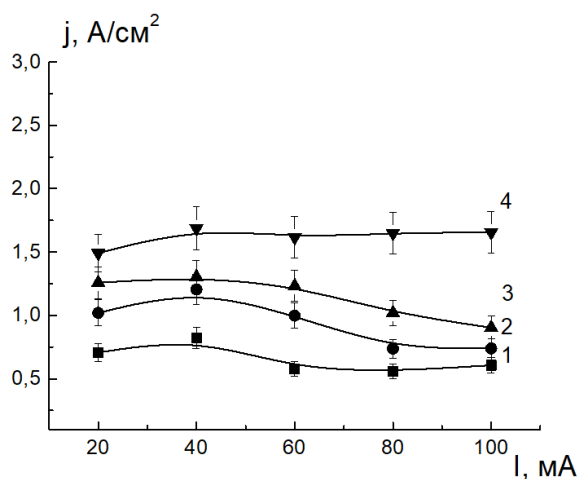
а



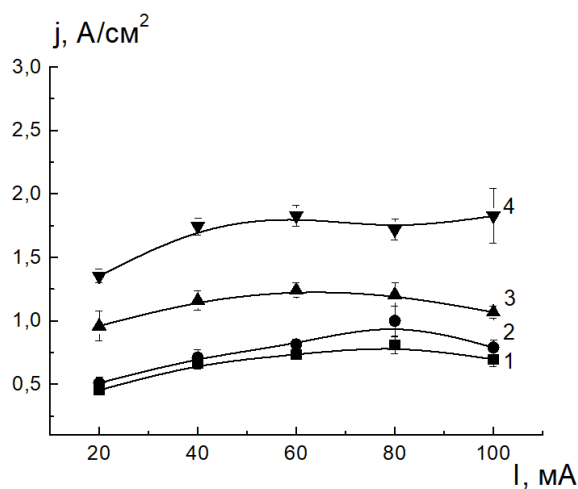
б

Рис. 2. Внешний вид разряда при различных параметрах и концентрациях раствора: а – ЛСН; б – ОХА  
Fig.2 Discharge view at the several concentrations of solution and discharge currents: a – SLS; b – AOTC

Величины катодного падения потенциала  $U_c$  (рис. 4а) с увеличением концентрации раствора снижаются. Рост тока разряда вызывает незначительный, порядка 50 В, рост катодного падения потенциала. В целом величины  $U_c$  являются типичными для разрядов над жидкими катодами. Практически во всем диапазоне исследованных концентраций, за исключением наиболее концентрированного раствора, величины  $U_c$  для случая разряда над катионактивным ПАВ оказываются ниже значений, полученных для разряда над анионактивным ПАВ. С точки зрения природы растворенного вещества, поверхность раствора катионактивного ПАВ заряжена положительно, а раствора анионактивного – отрицательно, и это может объяснить более низкие значения катодного падения потенциала над ОХА, по сравнению с ЛСН.



а



б

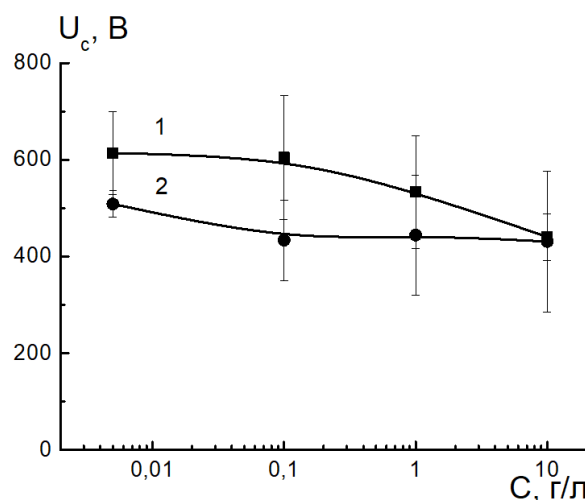
Рис. 3. Плотность тока в положительном столбе разряда ЛСН (а) и ОХА (б) в зависимости от тока разряда при концентрациях раствора, г/л: 1 -  $5 \cdot 10^{-3}$ ; 2 - 0,1; 3 - 1; 4 - 10  
 Fig. 3. Current density in the positive column of discharge under (а) SLS and (б) AOTC at concentrations, g/L: 1 -  $5 \cdot 10^{-3}$ ; 2 - 0.1; 3 - 1; 4 - 10

Напряженность электрического поля в положительном столбе разряда слабо зависит от концентрации раствора (рис. 4б). Для разряда над раствором катионоактивного ПАВ напряженности систематически лежат ниже, чем для случая анионоактивного ПАВ.

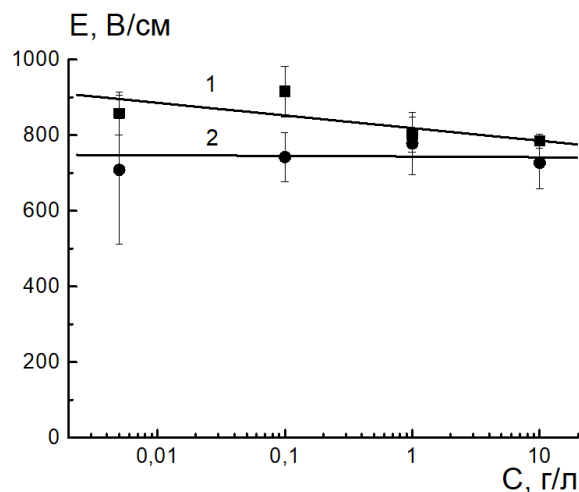
Характер изменения газовой температуры с ростом концентрации раствора падающий (рис. 5). В пределах погрешности измерений температура не зависит от типа ПАВ в растворе. Рост тока разряда вызывает увеличение температуры нейтральной компоненты. Колебательная температура молекул азота в состоянии  $N_2(C^3\Pi_u)$  (рис. 6) лежит в диапазоне 5000-7500 К, несколько возрастая в сильно концентрированных растворах для случаев обоих типов ПАВ. При увеличении тока разряда

можно увидеть слабую тенденцию к росту колебательной температуры, однако, в пределах погрешности эксперимента, однозначно утверждать о наличии такого роста следует с осторожностью.

Зная температуру нейтральных частиц и напряженность электрического поля, мы рассчитали приведенную напряженность поля в положительном столбе разряда (рис. 7). В пределах погрешности её значения практически линейно уменьшаются с ростом концентрации раствора в пределах 10-15 Td, что хорошо согласуется с результатами, полученными ранее для растворов сульфанола [19-21]. Рост тока разряда приводит к линейному росту приведенной напряженности. Величины приведенной напряженности электрического поля не зависят от типа ПАВ в растворе.



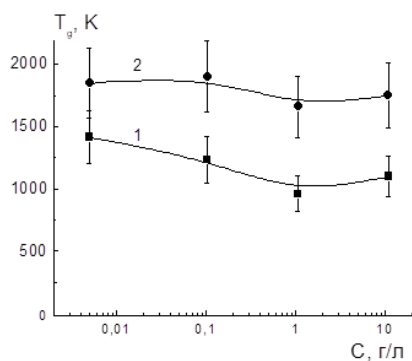
а



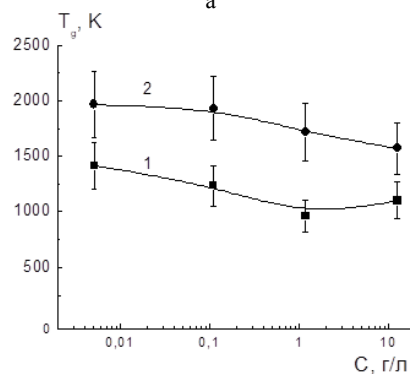
б

Рис. 4. Катодное падение потенциала (а) и напряженность электрического поля (б) в зависимости от концентрации раствора: 1 - ЛСН; 2 - ОХА. I=40 мА

Рис. 4. Cathode voltage drop (а) and electric field strength (б) as a functions of solution concentration: 1 - SLS; 2 - AOTC. I=40 mA



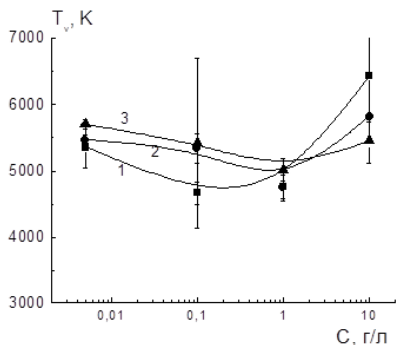
а



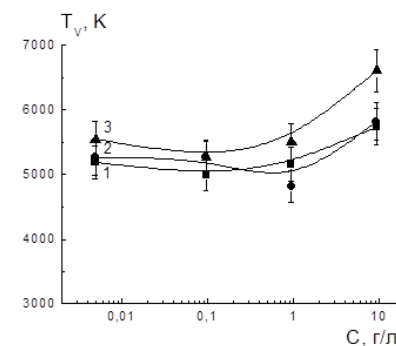
б

Рис. 5. Температура нейтральной компоненты плазмы разряда над растворами ЛСН (а) и ОХА (б) в зависимости от концентрации раствора при токах разряда: 1 – 40 мА; 2 – 100 мА

Fig. 5. Gas temperatures in the positive column of discharge under (a) SLS and (б) AOTC at the discharge current: 1 – 40 mA; 2 – 100 mA



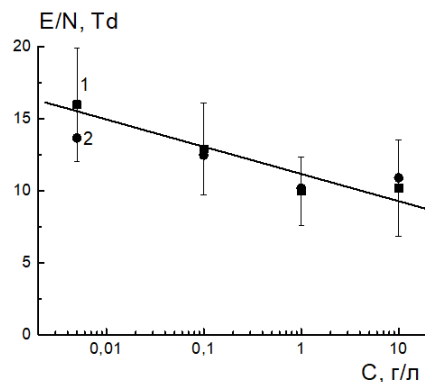
а



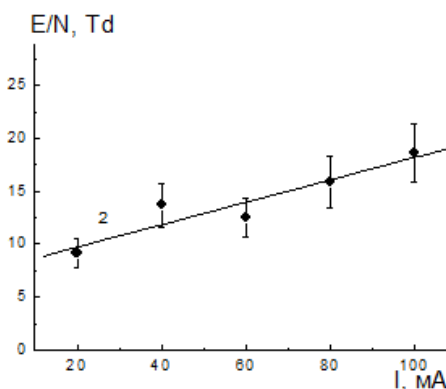
б

Рис. 6. Колебательная температура  $N_2(C^3\Pi_u)$  над растворами ЛСН (а) и ОХА (б) в зависимости от концентрации раствора при токах разряда: 1 – 20 мА; 2 – 60 мА; 3 – 100 мА

Fig. 6. Vibrational temperature of  $N_2(C^3\Pi_u)$  under (a) SLS and (б) AOTC at the discharge current: 1 – 20 mA; 2 – 60 mA; 3 – 100 mA



а



б

Рис. 7. Приведенная напряженность электрического поля в зависимости от концентрации раствора (а) при  $I=40$  мА и тока разряда (б) при  $C=5 \cdot 10^{-3}$  г/л: 1 – ЛСН; 2 – ОХА

Fig. 7. Reduced electric field as a function of solution concentration (a) at  $I=40$  mA and as a function of discharge current (б) at  $C=5 \cdot 10^{-3}$  g/L: 1 – SLS; 2 – AOTC

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые систематически исследованы электрофизические и оптические характеристики разряда, горящего при атмосферном давлении в воздухе над водными растворами органических поверхностно-активных веществ – анионно-активного лаурилсульфата натрия и катионно-активного октодецил триметил хлорида аммония. Полученная совокупность экспериментальных данных является фундаментом, необходимым для моделирования газового разряда и установления как каналов плазмохимической деструкции растворенных веществ, так и для расчета отвечающих за нее потоков активных частиц на поверхность раствора.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, государственное задание.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M., Zhang Q., Yan Z., Xue Q.** Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chem. Eng. J.* 2014. V. 236. P. 348-368.
2. **Choukourov A.L., Manukyan A.S., Shutov D.A., Rybkin V.V.** Physico-chemical properties of dc current discharge plasma with liquid cathode. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 12. P. 4-16.
3. **Рыбкин В.В., Шутов Д.А.** Электрические разряды атмосферного давления как инструмент химической активации водных растворов. *Физика плазмы.* 2017. Т. 43. № 11. С. 929-954.
4. **Titov V.A., Rybkin V.V., Maximov A.I., Choi H.-S.** Characteristics of atmospheric pressure glow discharge with aqueous electrolyte cathode. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2005. V. 25. N 5. P. 503-518.
5. **Шутов Д.А., Коновалов А.С., Исакина А.А., Бобкова Е.С.** Деструкция сульфанола в его водных растворах под действием контактного тлеющего разряда. I. Кинетика образования продуктов. *Химия высоких энергий.* 2013. Т. 47. № 4. С. 323-326.
6. **Шутов Д.А., Ольхова Е.О., Костылева А.Н., Бобкова Е.С.** Деструкция лаурилсульфата натрия в его водных растворах под действием контактного тлеющего разряда. *Химия высоких энергий.* 2014. Т. 48. С. 393-396.
7. **Zhang J.** Remove of phenolic compounds in water by low temperature plasma: a review of current research. *J. Water Resource and Protection.* 2009. V. 2. P. 99-109.
8. **Бобкова Е.С., Гриневич В.И., Исакина А.А., Рыбкин В.В.** Разложение органических соединений в водных растворах под действием электрических разрядов атмосферного давления. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2011. Т. 54. № 6. С. 3-17.
9. **Brisset J.-L., Fanmoe J., Hnatiuc E.** Degradation of surfactant by cold plasma treatment. *J. Env. Chem. Eng.* 2016. V. 4. N 1. P. 385-387.
10. **Tichonovas M., Krugly E., Racys V., Hippler R., Kauneliene V., Stasiulaitiene I., Martuzevicius D.** Degradation of various textile dyes as wastewater pollutants under dielectric barrier discharge plasma treatment. *Chem. Eng. J.* 2013. V. 229. P. 9-19.
11. **Шутов Д.А., Богданов П.В., Плескунов П.Л.** Деструкция органических красителей в водных растворах под действием низкотемпературной плазменной струи. *Химия высоких энергий.* 2016. Т. 50. № 1. С. 81-84.
12. **Shutov D.A., Smirnov S.A., Bobkova E.S., Rybkin V.V.** Ionization mechanism and chemical composition of an argon dc discharge with water cathode. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 35. N 1. P. 107-132.
13. **Smirnov S.A., Shutov D.A., Rybkin V.V., Bobkova E.S.** Physical parameters and chemical composition of a nitrogen dc discharge with water cathode. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 35. N 4. P. 639-657.
14. **Smirnov S.A., Shutov D.A., Rybkin V.V., Bobkova E.S.** Chemical composition, physical properties and populating mechanism of some O(I) states for a dc discharge in oxygen with water cathode. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2016. V. 36. N 2. P. 415-436.

## REFERENCES

1. **Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M., Zhang Q., Yan Z., Xue Q.** Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chem. Eng. J.* 2014. V. 236. P. 348-368.
2. **Choukourov A.L., Manukyan A.S., Shutov D.A., Rybkin V.V.** Physico-chemical properties of dc current discharge plasma with liquid cathode. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 12. P. 4-16.
3. **Rybkin V.V., Shutov D.A.** Atmospheric-pressure electric discharge as an instrument of chemical activation of water solutions. *Plasma Physics Reports.* 2017. V.43. N 11. P. 1089-1113.
4. **Titov V.A., Rybkin V.V., Maximov A.I., Choi H.-S.** Characteristics of atmospheric pressure glow discharge with aqueous electrolyte cathode. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2005. V. 25. N 5. P. 503-518.
5. **Shutov D.A., Konovalov A.S., Isakina A.A., Bobkova E.S.** Destruction of Sulfonol in Its Aqueous Solutions by Contact Glow Discharge Treatment: 1. Product Formation Kinetics. *High Energy Chemistry.* 2013. V. 47. N 4. P. 201-204.
6. **Shutov D.A., Ol'khova E.O., Kostyleva A.N., Bobkova E.S.** Destruction of Sodium Lauryl Sulfate in Its Aqueous Solutions by Contact Glow Discharge Treatment. *High Energy Chemistry.* 2014. V. 48. N 5. P. 343-345.
7. **Zhang J.** Remove of phenolic compounds in water by low temperature plasma: a review of current research. *J. Water Resource and Protection.* 2009. V. 2. P. 99-109.
8. **Bobkova E.S., Grinevich V.I., Isakina A.A., Rybkin V.V.** Decomposition of organic substances in aqueous solutions under action of electric discharges of atmospheric pressure. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2011. V. 54. N 6. P. 3-17 (in Russian).
9. **Brisset J.-L., Fanmoe J., Hnatiuc E.** Degradation of surfactant by cold plasma treatment. *J. Env. Chem. Eng.* 2016. V. 4. N 1. P. 385-387.
10. **Tichonovas M., Krugly E., Racys V., Hippler R., Kauneliene V., Stasiulaitiene I., Martuzevicius D.** Degradation of various textile dyes as wastewater pollutants under dielectric barrier discharge plasma treatment. *Chem. Eng. J.* 2013. V. 229. P. 9-19.
11. **Shutov D.A., Bogdanov P.V., Pleskunov P.L.** destruction of organic dyes in aqueous solution by low-temperature plasma jet treatment. *High Energy.* 2016. V. 50. N 1. P. 77-81.
12. **Shutov D.A., Smirnov S.A., Bobkova E.S., Rybkin V.V.** Ionization mechanism and chemical composition of an argon dc discharge with water cathode. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 35. N 1. P. 107-132.
13. **Smirnov S.A., Shutov D.A., Rybkin V.V., Bobkova E.S.** Physical parameters and chemical composition of a nitrogen dc discharge with water cathode. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 35. N 4. P. 639-657.
14. **Smirnov S.A., Shutov D.A., Rybkin V.V., Bobkova E.S.** Chemical composition, physical properties and populating mechanism of some O(I) states for a dc discharge in oxygen with water cathode. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2016. V. 36. N 2. P. 415-436.



15. **Коновалов А.С., Голубев С.Н., Иванов А.Н., Шутов Д.А., Смирнов С.А., Рыбкин В.В.** Электрофизические параметры тлеющего разряда с жидким электродом в атмосфере воздуха при пониженном давлении. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2012. Т. 55. № 12. С. 55–58.
16. Поверхностно-активные вещества и композиции. Справочник. Под ред. М.Ю. Плетнева. М.: ООО «Фирма Клавель». 2002. 768 с.
17. **Tan Xiaofeng.** Diatomic: A Spectral Simulation Program for Diatomic Molecules on Windows Platforms: Release 1.28. Baltimore, Maryland, United States: Johns Hopkins University. 2004. <http://www.cyber-wit.com>.
18. **Очкин В.Н.** Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит. 2010. 589 с.
19. **Шутов Д.А., Коновалов А.С., Дроник В.Д.** Характеристики разряда постоянного тока атмосферного давления над водными растворами сульфонола. *Теплофизика высоких температур*. 2014. Т. 52. № 5. С. 664–669
20. **Шутов Д.А., Смирнов С.А., Коновалов А.С., Иванов А.Н.** Характеристики разряда постоянного тока атмосферного давления над водными растворами сульфонола. *Теплофизика высоких температур*. 2016. Т. 54. № 4. С. 508–512.
21. **Шутов Д.А., Коновалов А.С., Исакина А.А., Бобкова Е.С.** Деструкция сульфонола в его водных растворах под действием контактного тлеющего разряда. II. Механизмы и моделирование кинетики. *Химия высоких энергий*. 2013. Т. 47. № 5. С. 389–392.
15. **Konovalev A.S., Golubev S.N., Ivanov A.N., Shutov D.A., Smirnov S.A., Rybkin V.V.** Parameters of low pressure plasma with liquid cathode in air atmosphere. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 12. P. 55–58 (in Russian).
16. Surfactants. Handbook. Ed. by M.Yu. Pletnev. M.: ООО “Firma Klavel”. 2002. 768 p. (in Russian).
17. **Tan Xiaofeng.** Diatomic: A Spectral Simulation Program for Diatomic Molecules on Windows Platforms: Release 1.28. Baltimore, Maryland, United States: Johns Hopkins University. 2004. <http://www.cyber-wit.com>.
18. **Ochkin V.N.** Spectroscopy of low-temperature plasma. M.: Pizmatlit, 2010. 589 p. (in Russian).
19. **Shutov D.A., Konovalev A.S., Dronik V.D.** Characteristics of Atmospheric Pressure DC Discharge above Sulfonol Water Solutions. *High Temperature*. 2014. V. 52. N 5. P. 627–632.
20. **Shutov D.A., Smirnov S.A., Konovalev A.S., Ivanov A.N.** Modeling of the Chemical Composition of DC Atmospheric Pressure Air Discharge Plasma in Contact with Aqueous Solutions of Sodium Dodecylbenzenesulfonate. *High Temperature*. 2016. V. 54. N 4. P. 483–487.
21. **Shutov D.A., Konovalev A.S., Isakina A.A., Bobkova E.S.** Destruction of sulfonol in its aqueous solutions by contact glow discharge treatment: 2. Mechanisms and kinetic simulation. *High Energy Chemistry*. 2013. V. 47. N 5. P. 258–261.

Поступила в редакцию 09.01.2020

Принята к опубликованию 23.01.2020

Received 09.01.2020

Accepted 23.01.2020