

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ ДИМЕТИЛСУЛЬФОНА В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ**М.А. Ахмедов, Ш.Ш. Хидиров, М.Ю. Капарова**

Магомед Абдурахманович Ахмедов*

Аналитический центр коллективного пользования ДНЦ РАН, ул. М. Гаджиева, 45, Махачкала, Российская Федерация, 367025

Кафедра физической и органической химии, Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, 43-а, Махачкала, Российская Федерация, 367000

E-mail: muhamadahmedov@mail.ru *

Шагабудин Шайдабекович Хидиров, Мадина Юсуповна Капарова

Кафедра физической и органической химии, Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, 43-а, Махачкала, Российская Федерация, 367000

E-mail: khidirov.dgu@mail.ru, madina.kaparova.1989@mail.ru

В настоящей работе методом циклической вольтамперометрии исследовано электрохимическое окисление диметилсульфона (ДМСО₂) на платиновом электроде в щелочной среде. Показано, что при электрохимическом окислении диметилсульфона в щелочной среде на гладком платиновом электроде в области потенциалов $E = 1,4-2,0$ В происходит существенное подавление реакции выделения кислорода (O₂). Методами сканирующей электронной микроскопии, комбинационного рассеивания и инфракрасной спектроскопии установлено, что при анодном окислении ДМСО₂ на платиновом электроде основным веществом является диметилдисульфид (ДМДСО₂). Препаративным электролизом водных растворов различных концентраций ДМСО₂ в 0,1 М растворе NaOH при контролируемых потенциалах $E = 1,6$ и $1,8$ В установлено, что выход по току основного вещества составляет не более 84%. На основании данных физико-химического анализа конечных продуктов препаративного электролиза предложен механизм образования диметилдисульфона в щелочной среде. Показано, что окисление диметилсульфона идет в кислородной области путем разрыва C-S связей в молекуле ДМСО₂ с образованием метильных (CH₃[•]) и метилсульфоновых (CH₃S[•](O)₂) радикалов. Предположено, что метилсульфоновые радикалы легко димеризуются с образованием устойчивых молекул ДМДСО₂ и десорбируются в объеме раствора, а метильные радикалы связываются с HO[•] радикалами с образованием молекул метанола. Последнее хорошо хемосорбируется на поверхности платины с образованием адсорбированных СОН-частиц, которые окисляются на платиновом электроде с образованием и выделением из объема раствора анолита углекислого газа (СО₂). Образование молекул метанола идентифицировано методом хроматомасс-спектрометрии, а выделение углекислого газа – методом гравиметрии.

Ключевые слова: циклическая вольтамперометрия, диметилсульфон, гладкая платина, диметилдисульфид, потенциал, поляризация, радикал, электроокисление, электролиз

ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF DIMETHYL SULFONE IN ALKALINE MEDIUM

M.A. Akhmedov, Sh.Sh. Khidirov, M.Yu. Kaparova

Magomed A. Akhmedov*

Analytical Center for Collective Use, Dagestan Scientific Center of the RAS, M. Gadzhiev st., 45, Makhachkala, 367025, Russia

Department of Physical and Organic Chemistry, Dagestan State University, M. Gadzhiev st., 43a, Makhachkala, 367000, Russia

E-mail: muhamadahmedov@mail.ru *

Shagabudin Sh. Khidirov, Madina Yu. Kaparova

Department of Physical and Organic Chemistry, Dagestan State University, M. Gadzhiev st., 43a, Makhachkala, 367000, Russia

E-mail: khidirovdgu@mail.ru, madina.kaparova.1989@mail.ru

In this paper the electrochemical oxidation of dimethyl sulfone (DMSO₂) on a platinum electrode in an alkaline medium has been studied by cyclic voltammetry. It is shown that during the electrochemical oxidation of dimethylsulfone in an alkaline medium on a smooth platinum electrode, a significant suppression of the oxygen evolution (O₂) occurs in the potential range of E = 1.3-2.0 V. By scanning electron microscopy methods, Raman scattering and infrared spectrometry it is shown that the main substance is the dimethyl disulfone (DMDSO₂) during the anodic oxidation of DMSO₂ on a platinum electrode. By the preparative electrolysis of aqueous solutions of various concentrations of DMSO₂ in 0.1 M NaOH solution at controlled potentials E = 1.6 and 1.8 V it is established that the current yield of the base material is not more than 84%. Based on the data of the physicochemical analysis of the final products of preparative electrolysis, a mechanism is proposed for the formation of dimethyl disulfone in an alkaline medium. It has been shown that the oxidation of dimethyl sulfone proceeds in the oxygen region by breaking C-S bonds in the DMSO₂ molecule to form methyl (CH₃·) and methylsulfonic (CH₃S[·](O)₂) radicals. It is assumed that the methylsulfone radicals readily dimerize with the formation of stable DMDSO₂ molecules and are desorbed in the bulk of the solution, and the methyl radicals bind to the HO radicals to form methanol molecules. The latter is well chemisorbed on the surface of platinum with the formation of adsorbed COH particles that are oxidized on a platinum electrode with the formation and evolution of carbon dioxide (CO₂) from the volume of the anolyte solution. The formation of molecules of methanol was identified by the method of chromato-mass - spectrometry, and the emission of carbon dioxide by the gravimetry.

Keywords: cyclic voltammetry, dimethyl sulfone, smooth platinum, dimethyl disulfone, potential, polarization, radical, electrooxidation, electrolysis

Для цитирования:

Ахмедов М.А., Хидиров Ш.Ш., Капарова М.Ю. Электрохимическое окисление диметилсульфона в щелочной среде. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 8. С. 32–39

For citation:

Akhmedov M.A., Khidirov Sh.Sh., Kaparova M.Yu. Electrochemical oxidation of dimethyl sulfone in alkaline medium. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 8. P. 32–39

ВВЕДЕНИЕ

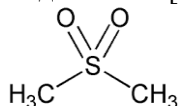
Сульфоны – класс органических соединений с общей формулой R-S(O)₂-R' (где R, R' – углеводородные радикалы алифатических и ароматических групп), по физико-химическим свойствам являются высококипящими веществами, имеют высокую химическую и термическую ста-

бильность и обладают высокой окислительной стабильностью [1-5].

В исследованиях [6-10] по электропроводности, вязкости, плотности сульфонов в широком диапазоне низких и высоких температур, а также по химической и термической устойчивости сульфоновых электролитных систем, показана возможность их использования в литиевых аккумуля-

ляторах в качестве электродных (анодных и катодных) материалов и особенно в качестве растворителей в электролитах литиевых солей. Известно, что ароматические сульфоны [11, 12] в основном используются для получения полимерных и электродных материалов, а алифатические сульфоны в основном применяются для приготовления электролитных систем [13, 14].

Наиболее известным и широко используемым растворителем из низкомолекулярных сульфонов для приготовления литиевых электролитов является диметилсульфон. Диметилсульфон (ДМСО₂) относится к классу алифатических сульфонов, которые в обычных условиях представляют из себя бесцветные призматические кристаллы, хорошо растворимые в воде [15]. По химическим свойствам диметилсульфон является относительно инертным соединением [16].



Работа [17] посвящена выяснению закономерностей поведения гладких Pt и Pd, а также Pt/Pt электродов в растворах диметилсульфоксида (ДМСО). Указано, что адсорбция ДМСО из водных растворов на этих электродах сопровождается глубокими химическими изменениями с образованием прочных хемосорбированных частиц ДМСО, ориентированных атомами серы к поверхности Pt-электрода.

В работе [18] указано, что на гладком платиновом электроде в области анодных потенциалов адсорбции кислорода ДМСО окисляется до ДМСО₂.

В работах [19-22] рассмотрены способы получения и механизмы образования метансульфонокислоты из водных растворов диметилсульфона путем электрохимического окисления на гладком платиновом электроде в кислой среде.

В настоящей работе методами вольтамперометрических измерений, препаративного электролиза и анализа промежуточных и конечных продуктов с использованием методов молекулярной спектроскопии показано образование диметилдисульфона, и предложен механизм окисления диметилсульфона в щелочной среде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Анодные процессы окисления диметилсульфона в водных растворах изучены вольтамперометрическим методом с использованием потенциостата ИРС – Pro MF и методом препаративного электросинтеза. Измерения проводились в трехэлектродной ячейке. Рабочим электродом служила

гладкая платина с истинной поверхностью 0,057 см², вспомогательным электродом являлась гладкая платина, а электродом сравнения – хлоридсеребряный электрод. Значения потенциалов приведены относительно нормального водородного электрода (н.в.э).

Препаративный электросинтез осуществлялся при заданном потенциале в диафрагменном электролизере с разделением анодного и катодного отделений. В качестве диафрагмы использована катионитовая мембрана марки МК-40. В качестве катода и анода использовалась гладкая платина. Электролитом служил 0,1 М водный раствор NaOH. При стационарном электролизе в качестве источника постоянного тока использован выпрямитель ТУРЕ: TR-9252 с регулируемым напряжением.

В работе использованы реактивы: гидроксид натрия, диметилсульфон марок хч. Все растворы готовились на бидистиллированной и деионизованной воде.

Продукты электроокисления диметилсульфона анализировались методами гравиметрии, сканирующей электронной микроскопии с использованием растрового сканирующего электронного микроскопа SEM Leo-1450, а также методами ИК-спектроскопии с использованием спектрометра «Nicolet 6700» фирмы «Thermo Nicolet», рамановского спектрометра комбинационного рассеяния (КР) DXR Smart Raman Research фирмы «Thermo Fisher Scientific» и хромато-масс-спектроскопии на приборе ГХ Маэстро 7820А с масс-селективным детектором Agilent 5975 фирмы Agilent Technologies.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены циклические вольтамперограммы (ЦВА) гладкого платинового электрода в 0,1М растворе NaOH (1) и в присутствии 0,1-0,8 М растворов диметилсульфона. По данным ЦВА видно, что, начиная с потенциала 1,4 В, идет подавление реакции выделения кислорода в 0,1 М растворе NaOH.

На основании данных поляризационных измерений препаративный электролиз водных растворов ДМСО₂ в щелочной среде проводился при потенциалах 1,6 и 1,8 В. При препаративном электросинтезе, проводимом с катионитовой мембраной, температура повышается за счет джоулевого тепла. В связи с этим поддерживалась определенная температура (40-45 °С), так как ранее [22] было указано, что диметилдисульфид при T = 80-85 °С распадается на метансульфонокислоту и метансульфиновые кислоты.

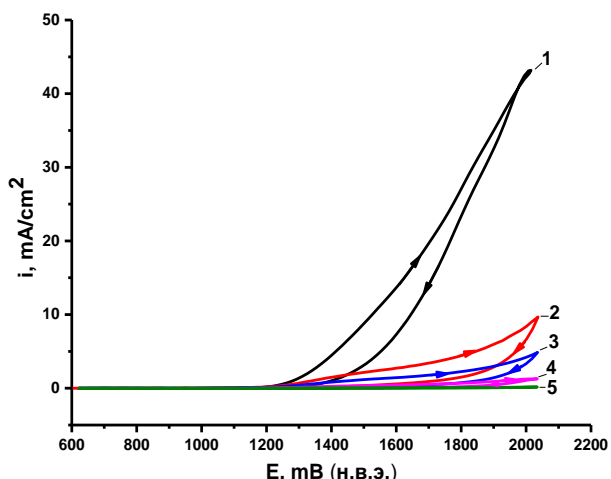


Рис. 1. Циклические вольтамперограммы гладкого платинового электрода в 0,1М растворе NaOH (1) и в присутствии ДМСО₂, М: 0,1 (2); 0,2 (3); 0,4 (4); 0,8 (5). Скорости развертки потенциала 50 мВ/с

Fig.1. Cyclic voltammograms of a smooth platinum electrode in 0.1 M NaOH solution (1) and in the presence of dimethyl sulfone, M: 0.1 (2); 0.2 (3); 0.4 (4); 0.8 (5). Potential sweep with speed of 50 mV/s

По окончании процесса электролиза при заданном значении потенциала раствор анолита охлаждали до $T = 5-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом выделялось кристаллическое вещество (рис. 2). Выделившиеся кристаллы многократно промывались холодной дистиллированной водой до $\text{pH} = 7$, затем высушивались в эксикаторе над концентрированной серной кислотой и взвешивались на лабораторных весах.

На рис. 2 представлен внешний вид кристаллов диметилдисульфона, выделенного из раствора анолита.

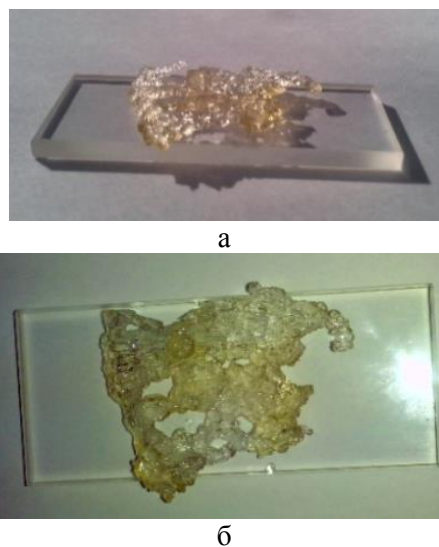


Рис. 2. Изображения кристаллов диметилдисульфона: вид сбоку (а) и сверху (б)

Fig. 2. The images of dimethyl disulfone crystals: side view (a) and a top view (б)

Выделенное бесцветное кристаллическое вещество идентифицировали методом ИК-спектроскопии.

Опытные данные характеристических полос поглощения (табл. 1) функциональных групп показывают, что основным продуктом электролиза при потенциалах 1,6 и 1,8 В по справочным значениям ИК спектров [23, 24] является диметилдисульфон (ДМДСО₂) с общей формулой:

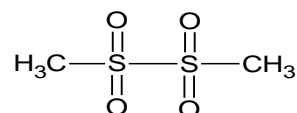


Таблица 1

Характерные группы поглощения ИК спектра диметилдисульфона, полученного электролизом водного раствора диметилсульфона

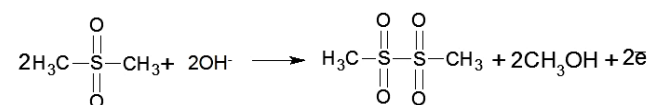
Table 1. The characteristic absorption groups of the IR spectrum of dimethyl disulfone obtained by electrolysis of an aqueous solution of dimethyl sulfone

Характерные группы	Область частоты, см ⁻¹	Характерные группы	Область частоты, см ⁻¹
CH ₃ -	1470-1435	C-S	750-580
O=S=O	1100-980	S-S	480-450
S=O	850-800		

Идентификация диметилдисульфона (рис. 3) также подтверждена методом КР-спектроскопии [24].

На рис. 4 представлены изображения поверхности гладкого платинового электрода до и после электролиза водных растворов диметилсульфона в щелочной среде, полученные с использованием растрового сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) SEM Leo-1450. Микрофотографии были получены при ускоряющем напряжении 10 кВ в режиме регистрации вторичных электронов при увеличении от 200 до 30000 в нескольких точках. Как видно из рис. 4, полученное соединение – ДМДСО₂ адсорбировано в виде пятигранных и шестигранных плоских форм, что указывает на сложную кристаллическую структуру образовавшегося соединения.

На основании физико-химического анализа продуктов электролиза диметилдисульфона в щелочной среде можно представить следующее суммарное уравнение электродной реакции:



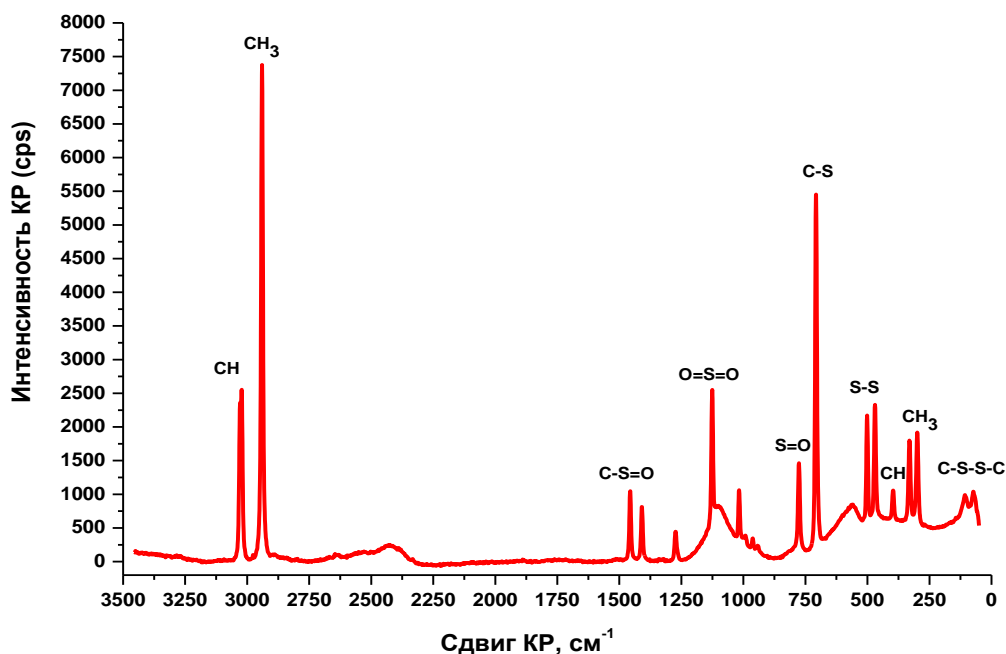


Рис.3. КР-спектр диметилдисульфона, полученный электролизом водного раствора ДМСО₂ в щелочной среде
 Fig.3. Raman spectrum of dimethyl disulfone obtained by electrolysis of an aqueous solution of DMSO₂ in an alkaline medium

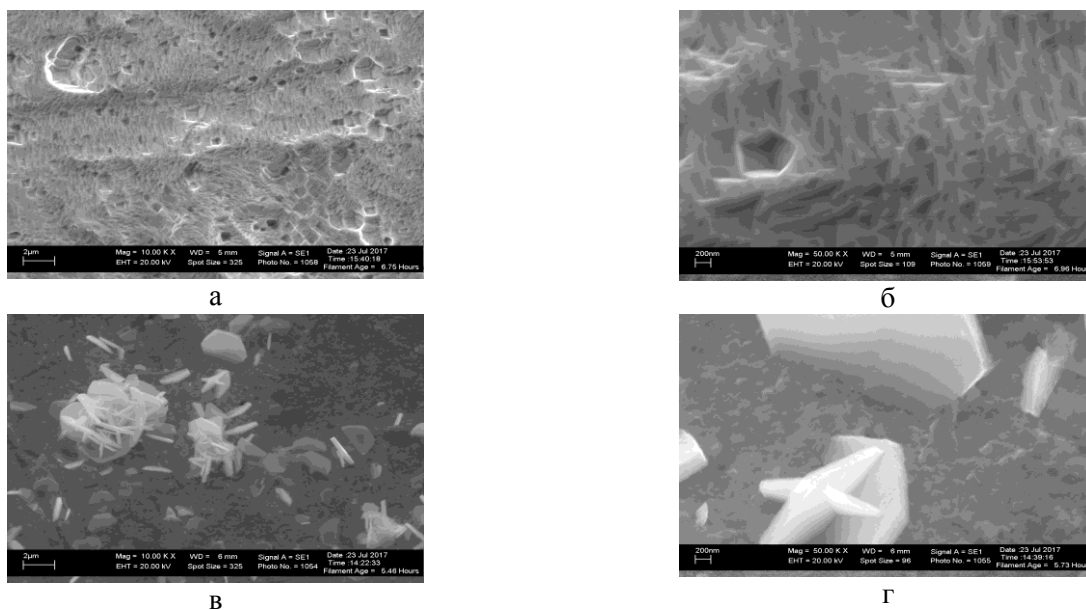


Рис. 4. Изображения поверхности гладкого платинового электрода до (а,б) и после (в,г) электролиза водного раствора диметилсульфона в щелочной среде
 Fig. 4. SEM images of the surface of a smooth platinum electrode before (a, б) and after (в, г) electrolysis of dimethyl sulfone from aqueous solution in an alkaline medium

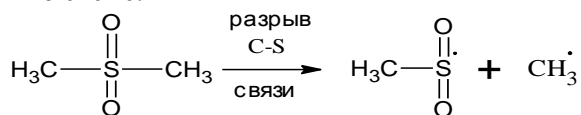
Данные препаративного электролиза водных растворов диметилсульфона в щелочной среде с выходом по току при различных концентрациях и контролируемых потенциалах (E) 1,6 и 1,8 В представлены в табл. 2. Количество ДМДСО₂ в анолите определяли гравиметрическим методом. Погрешность расчета выхода ДМДСО₂ по току составляет ±2-3%.

Таблица 2
 Данные препаративного электролиза водных растворов диметилсульфона в щелочной среде
 Table 2. The data of preparative electro synthesis of dimethyl sulfone of aqueous solutions in an alkaline medium

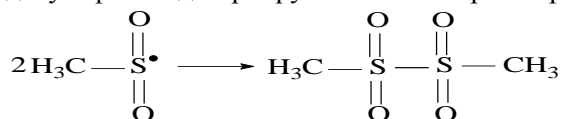
№	Исходное количество ДМСО ₂ , М	Выход по току, %	
		E = 1,6 В	E = 1,8 В
	0,1	80	84
	0,2	78	82
	0,4	78	82
	0,8	74	80

Суть процесса образования диметилдисульфона в водном растворе щелочи заключается в следующем. Известно, что адсорбция на платине и платиновых металлах органических веществ, содержащих более одного атома углерода, сопровождается разрывом С–С связей и димеризацией образующихся при деструкции радикалов.

В случае диметилсульфона аналогичный разрыв происходит по С–S связи с образованием метильных и метилсульфоновых радикалов. Следует отметить, что средняя энергия разрыва С–S связи (255 кДж/моль) почти в 1,5 раза меньше энергии связи С–С (347 кДж/моль). Следовательно, при достижении определенных анодных потенциалов происходит разрыв С–S связи с образованием метильных и метилсульфоновых радикалов по схеме:

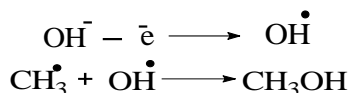


Метилсульфоновые радикалы легко димеризуются с образованием устойчивых молекул диметилдисульфона и десорбируются в объем раствора.

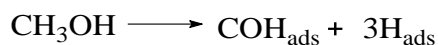


диметилдисульфон

Метильные радикалы ($\text{CH}_3\cdot$) также связываются с ОН-радикалами, образующимися при разряде гидроксид ионов с образованием молекул метанола.



Молекулы метанола на поверхности платинового анода хемосорбируются с образованием частиц состава COH .



Частицы COH_{ads} окисляются с образованием CO_2 , как и при полном окислении CH_3OH по уравнению [25]:



ЛИТЕРАТУРА

1. Fanny B., Yuhui Ch., Lee J., Schaltin S., Jan F., Bruce P.G. Sulfone-Based Electrolytes for Nonaqueous Li–O₂ Batteries. *J. Phys. Chem. C*. 2014. V. 118. N 33. P. 18892-18898. DOI: 10.1021/jp5048198.
2. Fujii S., McCarthy T.J. Sulfone-Containing Methacrylate Homopolymers: Wetting and Thermal Properties. *Langmuir*. 2016. V. 32. N 3. P. 765-771. DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b04265.
3. Vandermeeren L., Leyssens T., Peeters D. Theoretical study of the properties of sulfone and sulfoxide functional

Для качественной идентификации раствора анолита и обнаружения в нем примесей молекул метанола был использован метод хромато-масс-спектрометрии. Хромато-масс-спектрометрический анализ проведен на приборе ГХ Маэстро 7820А с масс-селективным детектором Agilent 5975 фирмы Agilent Technologies в режиме электронного удара при ионизирующей энергии 70 эВ с капиллярной колонкой HP-5ms. L = 30 м, d = 0,25 мм, в режиме программирования температуры от 45 °С до 250 °С, скорость нагрева 15 °С/мин, время анализа 30 мин, газ-носитель – гелий.

Образование углекислого газа CO_2 в анодном отделении доказано методом гравиметрии путем пропускания газа через хлоркальциевую трубку.

Таким образом, при электролизе различных концентраций водных растворов диметилсульфона в щелочной среде в анодном отделении на гладком платиновом электроде основным веществом является диметилдисульфон.

ВЫВОДЫ

При электрохимическом окислении диметилсульфона в щелочной среде на гладком платиновом электроде в области потенциалов $E = 1,4-2,0$ В происходит существенное подавление реакции выделения кислорода.

Методами ИК- и КР-спектрометрии установлено, что при анодном окислении диметилсульфона на платиновом электроде основным веществом является диметилдисульфон.

На основании данных физико-химического анализа продуктов препаративного электролиза предложен механизм образования диметилдисульфона в щелочной среде.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта программы УМНИК 2-15-10 №8809ГУ2/2015 (код 0016996) с использованием оборудования ЦКП ДГУ и АЦКП ДНЦ РАН.

REFERENCES

1. Fanny B., Yuhui Ch., Lee J., Schaltin S., Jan F., Bruce P.G. Sulfone-Based Electrolytes for Nonaqueous Li–O₂ Batteries. *J. Phys. Chem. C*. 2014. V. 118. N 33. P. 18892-18898. DOI: 10.1021/jp5048198.
2. Fujii S., McCarthy T.J. Sulfone-Containing Methacrylate Homopolymers: Wetting and Thermal Properties. *Langmuir*. 2016. V. 32. N 3. P. 765-771. DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b04265.
3. Vandermeeren L., Leyssens T., Peeters D. Theoretical study of the properties of sulfone and sulfoxide functional

- groups. *J. Molec. Struct.: THEOCHEM*. 2007. V. 804. N 3. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.theochem.2006.10.006.
4. **Maca J., Frk M., Rozsivalova Z., Sedlarikova M.** Properties of Sulfolane Based Aprotic Electrolytes. *Port. Electrochim. Acta*. 2013. V. 31. N 6. P. 321-330. DOI: 10.4152/pea.201306321.
 5. **Гафуров М.М., Рабаданов К.Ш., Атаев М.Б., Алиев А.Р., Ахмедов И.Р., Какагасанов М.Г., Крамынин С.П.** Колебательные спектры системы $\text{LiNO}_3\text{-(CH}_3\text{)}_2\text{SO}_2$. *ЖПС*. 2012. Т. 79. Вып. 2. С. 200-205.
 6. **Ярмоленко О.В., Юдина А.В., Игнатова А.А.** Современное состояние и перспективы развития жидких электролитных систем для литий-ионных аккумуляторов. *Электрохим. энергетика*. 2016. Т. 16. Вып. 4. С. 155–195.
 7. **Zhang H., Li Ch., M. Piszcz, E. Coya, Rojo T., Rodriguez-Martinez L. M., Armand M., Zhou Z.** Single lithium-ion conducting solid polymer electrolytes: advances and perspectives. *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. N 3. P. 797-815. DOI: 10.1039/c6cs00491a.
 8. **Nan Shao, Xiao-Guang Sun, Sheng Dai, De-en Jiang.** Electrochemical Windows of Sulfone-Based Electrolytes for High-Voltage Li-Ion Batteries. *J. Phys. Chem. B*. 2011. V. 115. N 42. P. 12120-12125. DOI: 10.1021/jp204401t.
 9. **Hilbig, P., Ibing L., Wagner R.; Winter M., Cekic-Laskovic I.** Ethyl Methyl Sulfone-Based Electrolytes for Lithium Ion Battery Applications. *Energies*. 2017. V. 10. N 9. P. 1312. DOI: 10.3390/en10091312.
 10. **Xu Kang.** Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chem. Rev.* 2004. V. 104. N 10. P. 4303-4417. DOI: 10.1021/cr030203g.
 11. **Zhao X., Zhang Q., Chen Ch.-M., Zhang B., Reiche S., Wan A., Zhang T., Schlogl R., Sheng S.D.** Aromatic sulfide, sulfoxide, and sulfone mediated mesoporous carbon monolith for use in supercapacitor. *Nano Energy*. 2012. V. 4. N 1. P. 624-630. DOI: 10.1016/j.nanoen.2012.04.003.
 12. **Pang J., Feng S., Zhang H., Jiang Zh., Wang G.** Synthesis and properties poly(arylene ether sulfone)s with pendant hyper-sulfonic acid. *RSC Adv.* 2015. N 5. P. 38298-38307. DOI: 10.1039/c5ra02107c.
 13. **Колосницын В.С., Шеина Л.В., Мочалов С.Э.** Физико-химические и электрохимические свойства растворов литиевых солей в сульфолане. *Электрохимия*. 2008. Т. 44. Вып 5. С. 620-623.
 14. **Колосницын В.С., Кострюкова Н.В., Легостаева М.В.** Электропроводность и термические свойства гелевых полимерных электролитов на основе сульфонов. *Электрохим. энергетика*. 2004. Т. 4. Вып. 2. С. 90-92.
 15. **Маркарян Ш.А., Азнаурян М.Г., Казоян Е.А.** Физико-химические свойства водных растворов диметил- и диэтилсульфонов. *ЖФХ*. 2011. Т. 85. Вып.12. С. 2291.
 16. **Беленький Л.И.** Получение и свойства органических соединений серы. М.: Химия. 1998. 560 с.
 17. **Алексеева Е.Ю., Сафонов В.А., Петрий О.А.** Потенциалы нулевого заряда и строение двойного электрического слоя на платине и палладии в среде диметилсульфоксида. *Электрохимия*. 1984. Т. 20. Вып. 7. С.945 -950.
 18. **Хидиров Ш.Ш., Омарова К.О. Хибиев Х.С.** О механизме анодного окисления диметилсульфоксида на платине в щелочной среде. *Вестн. ДГУ*. 2013. № 1. С. 184-187.
 19. **Хидиров Ш.Ш., Ахмедов М.А., Хибиев Х.С., Омарова К.О.** Патент РФ № 2496772. 2013.
 - groups. *J. Molec. Struct.: THEOCHEM*. 2007. V. 804. N 3. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.theochem.2006.10.006.
 4. **Maca J., Frk M., Rozsivalova Z., Sedlarikova M.** Properties of Sulfolane Based Aprotic Electrolytes. *Port. Electrochim. Acta*. 2013. V. 31. N 6. P. 321-330. DOI: 10.4152/pea.201306321.
 5. **Gafurov M.M., Rabadanov K.Sh., Ataev M.B., Aliev A.R., Akhmedov I.R., Kakagasanov M.G., Kraminin S.P.** Vibrational spectra of an $\text{LiNO}_3\text{-(CH}_3\text{)}_2\text{SO}_2$ system. *J. Appl. Spectroscopy*. 2012. V. 79. N 2. P. 184-188. DOI: 10.1007/s10812-012-9581-7.
 6. **Yarmolenko O.V., Yudina A.V., Ignatova A.A.** The state-of-the-art and prospects for the development of electrolyte systems for lithium power sources. *Elektrokhim. Energetika*. 2016. V. 16. N 4. P. 155–195. DOI: 10.18500/1608-4039-2016-4-155-195 (in Russian).
 7. **Zhang H., Li Ch., M. Piszcz, E. Coya, Rojo T., Rodriguez-Martinez L. M., Armand M., Zhou Z.** Single lithium-ion conducting solid polymer electrolytes: advances and perspectives. *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. N 3. P. 797-815. DOI: 10.1039/c6cs00491a.
 8. **Nan Shao, Xiao-Guang Sun, Sheng Dai, De-en Jiang.** Electrochemical Windows of Sulfone-Based Electrolytes for High-Voltage Li-Ion Batteries. *J. Phys. Chem. B*. 2011. V. 115. N 42. P. 12120-12125. DOI: 10.1021/jp204401t.
 9. **Hilbig, P., Ibing L., Wagner R.; Winter M., Cekic-Laskovic I.** Ethyl Methyl Sulfone-Based Electrolytes for Lithium Ion Battery Applications. *Energies*. 2017. V. 10. N 9. P. 1312. DOI: 10.3390/en10091312.
 10. **Xu Kang.** Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chem. Rev.* 2004. V. 104. N 10. P. 4303-4417. DOI: 10.1021/cr030203g.
 11. **Zhao X., Zhang Q., Chen Ch.-M., Zhang B., Reiche S., Wan A., Zhang T., Schlogl R., Sheng S.D.** Aromatic sulfide, sulfoxide, and sulfone mediated mesoporous carbon monolith for use in supercapacitor. *Nano Energy*. 2012. V. 4. N 1. P. 624-630. DOI: 10.1016/j.nanoen.2012.04.003.
 12. **Pang J., Feng S., Zhang H., Jiang Zh., Wang G.** Synthesis and properties poly(arylene ether sulfone)s with pendant hyper-sulfonic acid. *RSC Adv.* 2015. N 5. P. 38298-38307. DOI: 10.1039/c5ra02107c.
 13. **Kolosnitsyn V.S., Sheina L.V., Mochalov S.E.** Physicochemical and electrochemical properties of solutions of lithium salts in sulfolane. *Russ. J. Electrochem.* 2008. V. 44. N 5. P. 575–578. DOI: 10.1134/S102319350805011X.
 14. **Kolosnitsyn V.S., Kostryukova N.V., Legostaeva M.V.** Electrical conductivity and thermal properties of gel polymer electrolytes based on sulfones. *Elektrokhim. Energetika*. 2004. V. 4. N 2. P. 90-92 (in Russian).
 15. **Markaryan Sh.A., Aznauryan M.G., Kazoyan E.A.** Physicochemical properties of aqueous solutions of dimethyl- and diethylsulfones. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2011. V. 85. N 12. P. 2138-2141. DOI: 10.1134/S0036024411120211.
 16. **Belenky L.I.** Preparation and properties of organic sulfur compounds. М.: Kimiya. 1998. 560 p. (in Russian)
 17. **Alekseeva E.Yu., Safonov V.A., Petrii O.A.** Zero charge potentials and electric double layer structure on platinum and palladium in dimethyl sulfoxide. *Elektrokhimiya*. 1984. V. 20. N 7. P. 945-950 (in Russian).
 18. **Khidirov Sh.Sh., Omarova K.O. Khibiev Kh.S.** On the mechanism of anodic oxidation of dimethylsulfoxide on platinum in an alkaline medium. *Vestn. DSU*. 2013. N 1. P. 184-187 (in Russian).

20. **Хидиров Ш.Ш., Ахмедов М.А., Рабаданов М.Х.** Патент РФ № 2554880. 2015.
21. **Ахмедов М.А., Хидиров Ш.Ш.** Определение состава и свойств метансульфо кислоты методом вольтамперометрии. *ЖСХ*. 2014. Т. 55. Вып.6. С. 1204.
22. **Ахмедов М.А., Хидиров Ш.Ш., Капарова М.Ю., Хибиев Х.С.** Электрохимический синтез метансульфо кислоты из водных растворов диметилсульфона. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 12. С. 100-106.
23. **Тарасевич Б.Н.** ИК спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2012. 54 с.
24. **Шмидт В.** Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М.: Техносфера. 2007. 368 с.
25. **Дамаскин Б.Б., Некрасов Л.Н., Петрий О.А.** Электродные процессы в растворах органических соединений. М.: Изд-во МГУ. 1985. 312 с.
19. **Khidirov Sh.Sh., Akhmedov M.A., Khibiev Kh.S., Omarova K.O.** RF Patent. N 2496772. 2013. (in Russian).
20. **Khidirov Sh.Sh., Akhmedov M.A., Rabadanov M.Kh.** RF Patent. N 2554880. 2015. (in Russian).
21. **Akmedov M.A., Khidirov Sh.Sh.** Voltammetric determination of the composition and properties of methane sulfonic acid. *J. Struct. Chem.* 2014. V. 55. N 6. P. 1148-1151. DOI: 10.1134/S0022476614060249.
22. **Akhmedov M.A., Khidirov Sh.Sh., Kaparova M.Yu., Khibiev Kh.S.** Electrochemical synthesis of methanesulfonic acid from aqueous solutions of dimethyl sulfone. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 12. P. 100-106. DOI: 10.6060/tcct.20165912.5345 (in Russian).
23. **Tarasevich B.N.** IR spectra of the main classes of organic compounds. M.: MSU M.V. Lomonosov. 2012. 54 p. (in Russian).
24. **Schmidt V.** The optical spectroscopy for chemists and biologists. M.: Tekhnosphere. 2007. 368 p. (in Russian).
25. **Damaskin B.B., Nekrasov L.N., Petrii O.A.** Electrode processes in solutions of organic compounds. M.: Izd. MSU. 1985. 312 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 19.01.2018

Принята к опубликованию 12.07.2018

Received 19.01.2018

Accepted 12.07.2018