УДК 661.961

Е. А. Соловьев, М. В. Морозов, Т. П. Султанов, К. В. Холин, М. К. Кадиров

ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА НА СТЕКЛОУГЛЕРОДНОМ ЭЛЕКТРОДЕ, МОДИФИЦИРОВАННОМ НИКЕЛЬ-СОДЕРЖАЩИМ КОМПОЗИТОМ С НАНОТРУБКАМИ

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, генерация водорода, биполимерные никельсодержащие комплексы, электрокатализ.

Получены и исследованы композиты на основе никельсодержащего биополимерного комплекса Ni(20%) -NaPG, обладающие каталитическими свойствами в реакции выделения водорода. При создании композита в него были введены углеродные нанотрубки TUBALL для повышения реакционной способности и увеличения электрической проводимости. Методом циклической вольтамперометрии показано, что использование в каталитических чернилах углеродных нанотрубок с комплексом Ni(20%) – NaPG обеспечивает снижение перенапряжения реакции выделения водорода на 65 мВ по отношению к немодифицированному стеклоуглеродному электроду. Амплитуда катодного тока при потенциале -1,5 В на электроде с углеродными нанотрубками и комплексом Ni(20%) – NaPG в 2,34 раза выше по отношению к немодифицированному стеклоуглеродному электроду. Также проводилось сравнение перенапряжения реакции выделения водорода композитов с нанотрубками и композитов, изготовленных с использованием углеродной сажи VULCAN XC72, которая широко применяется при создании электродов электрокатализаторов. Методом сканирующей электронной микроскопии исследована морфология поверхности модифицированных электродов до и после введения нанотрубок. Показано, что на поверхности стеклоуглерода с композитом, содержащим углеродные нанотрубки, образовалась развитая структура, где видны нанотрубки со средней толщиной 15-20 нм. Элементный состав поверхности модифицированных электродов, полученный с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, показал наличие никеля и натрия, которые присутствуют в комплексе. Полученные результаты показали значительное повышение тока в области выделения водорода за счет использования углеродных нанотрубок в качестве токопроводящих структур в составе композитных каталитических чернил с биополимерным комплексом Ni(20%) – NaPG, что подтверждает перспективность выбранного направления исследований.

E. A. Soloviev, M. V. Morozov, T. P. Sultanov, K. V. Kholin, M. K. Kadirov

ELECTROCATALYTIC HYDROGEN RELEASE AT A GLASSY CARBON ELECTRODE MODIFIED

WITH A NICKEL-CONTAINING NANOTUBE COMPOSITE

Keywords: carbon nanotubes, hydrogen generation, bipolymeric nickel-containing complexes, electrocatalysis.

Composites based on the nickel-containing biopolymer complex Ni(20%) – NaPG, possessing catalytic properties in the reaction of hydrogen evolution were obtained and studied. When creating the composite, TUBALL carbon nanotubes were introduced into it to increase reactivity and electrical conductivity. Cyclic voltammetry showed that the use of carbon nanotubes with the Ni(20%) - NaPG complex in catalytic inks provides a decrease in the overpotential of the hydrogen evolution reaction by 65 mV relative to the unmodified glassy carbon electrode. The amplitude of the cathode current at a potential of -1.5 V on the electrode with carbon nanotubes and the Ni(20%) – NaPG complex is 2.34 times higher relative to the unmodified glassy carbon electrode. A comparison was also made of the overpotential of the hydrogen evolution reaction of composites with nanotubes and composites made using VULCAN XC72 carbon black, which is widely used in the creation of electrocatalyst electrodes. The surface morphology of the modified electrodes before and after the introduction of nanotubes was studied using scanning electron microscopy. It was shown that a developed structure was formed on the surface of glassy carbon with a composite containing carbon nanotubes, where nanotubes with an average thickness of 15-20 nm are visible. The elemental composition of the surface of the modified electrodes, obtained using energy-dispersive X-ray spectroscopy, showed the presence of nickel and sodium, which are present in the complex. The results obtained showed a significant increase in the current in the region of hydrogen evolution due to the use of carbon nanotubes as conductive structures in the composite catalytic ink with the biopolymer complex Ni(20%) - NaPG, which confirms the prospects of the chosen research direction.

Введение

Исследования в области возобновляемых источников энергии имеют большую перспективу, так как нынешний энергетический сектор для генерации энергии использует углеродсодержащее топливо, которое невозобновляемо. В качестве энергоносителя для дальнейшей генерации энергии можно использовать водород, который можно получить наиболее практичным и экологичным методом, а именно, электролизом воды [1-4]. Для того, чтобы повысить производительность метода получения водорода электролизом воды, необходимо использовать модифицированные электроды с катализаторами [5-8]. Однако ряд высокоэффективных катализаторов, таких как платина, достаточно дорогие, и, следовательно, малодоступны. Поэтому развитие и исследование в области более доступных катализаторов для реакции выделения водорода из воды имеет перспективу.

Исследованы полимерные структуры в качестве катализаторов, что привлекательно ввиду их потенциальной доступности [9, 10]. Для повышения производительности по генерации водорода в

полимерные структуры вводят металлы, причем наиболее доступными являются неблагородные металлы. Ранее нами также были исследованы металлорганического каталитические свойства биополимерного комплекса в реакции выделения водорода из воды, где в качестве металла [11, 12]. использовался марганец Также перспективным металлом является никель, поскольку введение его состав в металлорганического биополимерного комплекса значительно повышает его реакционную способность [13]. Кроме комплекса, на реакционную способность электрода оказывает влияние метод нанесения катализатора на рабочий электрод и состав чернил. Введение токопроводящих добавок, таких как углеродные нанотрубки, значительно повышает электропроводность чернил и их реакционную способность, что требует делает исследования такого типа актуальными. Данное исследование направлено на изучение каталитических свойств модифицированного электрода с нанесенным на его поверхность композитом, содержащим углеродные нанотрубки с никельсодержащим биополимерным комплексом пектата натрия с никелем Ni(20%) - NaPG.

Экспериментальная часть

В качестве органической матрицы для введения ионов никеля использовали цитрусовый пектин марки Classic C-401 производства Herbstreith & Fox 261 (Германия). Молекулярная масса цитрусового пектина составляет 17,6 кДа. Для синтеза биополимерных комплексов Ni(20%) – NaPG. использовали NiSO₄ · 5H₂O, NaOH и другие реагенты чистотой более 99,9%.

В качестве буферной соли для исследования каталитических свойств были использованы натрий фосфатный с чистотой более 99,7% и гидрокарбонат калия с чистотой 99,9%, который был растворен в деионизованной воде с концентрацией 0,1М. Полученный таким образом электролит обеспечивал в электрохимической ячейке нейтральную среду с рН, равным 7.

Электрохимические исследования композитов проводились методом циклической вольтамперометрии на стойке BASi C3 при пропускании через ячейку аргона с чистотой 99,99%.

В качестве материала подложки рабочего электрода, на которую наносились каталитические чернила, был использован стеклоуглерод марки СУ-2000: пористость 1,0 - 2,0 %, предел прочности на изгиб 130–160 МПа, удельное электросопротивление 45–50 мкОм*м.

Подложкой для рабочего электрода служила пластина стеклоуглеродного электрода (СУ) площадью 4 см² и толщиной 3 мм. Были сняты циклические вольтамперограммы на рабочих электродах с разными композитами на поверхности при разном диапазоне потенциалов в области от -1500 мВ до 100 мВ относительно хлоридсеребряного электрода сравнения Ag/AgCl со скоростью развертки 50 мВ/с. В качестве вспомогательного электрода использовали платиновую проволоку.

Первый композит создан на основе сажи VULCAN XC72 (10 мг) с добавлением 250 мкл жидкого полимера Nafion, 2 мл изопропилового спирта, 1,5 мл деионизованной воды и 10 мг комплекса Ni(20%) – NaPG (20% ионов никеля в полимерной цепи) [14, 15].

Второй композит создан на основе углеродных нанотрубок (УНТ) TUBALL (10 мг) с добавлением 250 мкл жидкого полимера Nafion, 2 мл изопропилового спирта, 1,5 мл деионизованной воды и 10 мг комплекса Ni(20%) – NaPG.

Данные композиты были 1,5 часа продиспергированы в ультразвуковой ванне. После ультразвукового диспергирования полученные композиты наносились на поверхность стеклоуглеродного электрода и высушивались на открытом воздухе.

Поверхность стеклоуглерода анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Evo LS-10.

Результаты и обсуждение

Поверхность композитов была изучена методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при ускоряющем напряжении 15 кэВ (рис. 1). На основании этих изображений можно сделать вывод, что на поверхности стеклоуглерода с композитом из нанотрубок образовалась развитая структура в виде волокон, где видны нанотрубки со средней толщиной 15-20 нм.



Рис. 1 – Изображение поверхности композита первого типа (слева) и второго типа (справа) на поверхности стеклоулерода

Fig. 1 – Image of the first type composite surface (left) and the second type composite surface (right) on the surface of glassy carbon

Элементный состав поверхности композита с нанотрубками и комплексом Ni(20%) – NaPG, полученный методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, показал наличие никеля на поверхности в атомном соотношении 0,09 %, также на поверхности присутствует углерод (42,5 %), кислород (3,16 %), фтор (52,01 %), натрий (0,71 %), сера (0,85 %), железо (0,64 %). Данные представлены на рисунке 2.



Рис. 2 – Энергодисперсионный рентгеновский спектр поверхности стеклоулерода с композитом второго типа при ускоряющем напряжении 15 кэВ

Fig. 2 – Energy dispersive X-ray spectrum of the glass-iron surface with type II composite at an accelerating voltage of 15 keV

Также в данном исследовании были зарегистрированы циклические вольтамперограммы в области восстановления воды для чистого стеклоуглеродного электрода и с нанесенными на его поверхность каталитическими композитными чернилами. Были взяты два типа композита с никельсодержащим биополимерным комплексом Ni(20%) – NaPG и без него. Результаты исследования данным методом представлены на рисунке 3.



Рис. 3 – Циклические вольтамперограммы, снятые в нейтральной среде в атмосфере аргона отн. Ag/AgCl при скорости развертки 50 мB/c

Fig. 3 – Cyclic voltammetrygrams taken in neutral medium in an argon atmosphere Ag/AgCl at a sweep speed of 50 mV/s $\,$

В литературе известны две экспериментальные определения потенциала методики реакции выделения водорода: определение потенциала начала реакции (onset potential) выделения водорода, который сопровождается началом активного роста тока [16, 17], и определения перенапряжения реакции выделения водорода, основанная на выборе плотности тока, при которой выделение газа становится видно на электроде и ток быстро меняется при малых потенциалах [18, 19]. В данной работе была выбрана методика определения onset-потенциала реакции выделения водорода, поскольку этот потенциал определяется по точке перегиба катодной ветви циклической вольтамперометрии, так как эта методика более воспроизводима в лабораторных условиях по сравнению определением потенциала с по визуальному выделению газа. Следует отметить, что кинетика реакции выделения волорола осложняется явлениями адсорбции и десорбции водорода, проходя через более простые промежуточные стадии разряда ионов водорода, рекомбинации адсорбированных атомов водорода и их электрохимической десорбции [20, 21]. В данной работе не ставится цель установить маршрут реакции и определить лимитирующую стадию в данном маршруте.

По циклической вольтамперограмме на рис. 3 был определен onset-потенциал вылеления водорода, который сопровождается началом активного роста тока [16, 17]. Данные onsetпотенциала и амплитуды катодного тока при -1,5 В для разных модификаций поверхности электрода представлены в таблице 1. Onset-потенциал снизился на электроде с VULCAN XC72 на 25 мВ, с VULCAN XC72 и комплексом Ni(20%) — NaPG – на 45 мВ, на электроде с нанотрубками TUBALL – на 55 мВ, на электроде с нанотрубками TUBALL и комплексом Ni(20%) - NaPG_ на 65 мB относительно немодифицированного электрода. Амплитуда катодного тока при потенциале -1,5 В на немодифицированном электроде составляет 1,75 мА, на электроде с VULCAN XC72 этот ток выше в 1,14 раза, на электроде с TUBALL в 1,77 раза, на электроде с VULCAN XC72 и комплексом Ni(20%) – NaPG выше в 2,14 раза, на электроде с TUBALL и комплексом Ni(20%) -NaPG в 2,34 раза.

Таблица 1 - Onset-потенциалы и амплитуда тока на различных модифицированных электродах

Table 1 - Onset-potentials and current amplitude atdifferent modified electrodes

Модификация поверхности электрода	Onset- потенциал, мВ	Амплитуда катодного тока при потенциале -1,5 В, мА
Без модификаций, чистый	-1420	1,75
VULCAN XC72	-1395	2
VULCAN XC72 c Ni(20%) – NaPG	-1375	3,75
TUBALL	-1365	3,1
TUBALL c Ni(20%) – NaPG	-1355	4,1

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наличие углеродных нанотрубок в каталитических чернилах с никельсодержащим биополимерным комплексом Ni(20%) – NaPG влияет на активность протекания реакции выделения водорода из воды.

Вывод

Исследован и охарактеризован аналитическими методами композит, в составе которого нанотрубки и биополимерный комплекс пектата натрия с Ni(20%) – NaPG. никелем Методом СЭМ определена морфология композита и диаметр углеродных нанотрубок, который составил 15-20 нм. Элементный анализ показал наличие никеля и натрия в композите. Модифицированный электрод, на поверхность которого нанесены каталитические чернила с углеродными нанотрубками и комплексом Ni(20%) – NaPG, эффективно снижает перенапряжение реакции выделения водорода из воды, по сравнению с электродами без комплекса, а также с электродом с сажей и с комплексом. Перенапряжение реакции 65 снизилось на мΒ по отношению к немодифицированному электроду. Полученные результаты могут быть применены при создании электролизеров с доступными и экологичными биополимерными электрокатализаторами.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта Республики Татарстан, предоставленного молодым ученым и молодежным научным коллективам на проведение научных исследований в наиболее перспективных и значимых для развития Республики Татарстан областях.

Литература

- A. H. Schrotenboer, A. A. Veenstra, M. A. uit het Broek, E. A. Ursavas, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112744 (2022). DOI: 10.1016/j.rser.2022.112744
- 2) M. Otto, K. L. Chagoya, R. G. Blair, S. M. Hick, J. S. Kapat, *Journal of Energy Storage*, **55**, 105714 (2022). DOI: 10.1016/j.est.2022.105714
- 3) M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180 (2021). DOI: 10.1016/j.rser.2021.111180
- 4) S. H. Lee, H. Kwon, S. Kim, J. Yun, E. Kim, G. Jang, D. W. Jeong, *Chemical Engineering Journal*, **495**, 153411 (2024). DOI: 10.1016/j.cej.2024.153411
- 5) S. Wang, A. Lu, C. J. Zhong, *Nano Convergence*, **8**, 1, 4 (2021). DOI: 10.1186/s40580-021-00254-x
- 6) A. Alamiery, *ChemPhysMater*, **3**, 1, 64-73 (2024). DOI: 10.1016/j.chphma.2023.09.002
- 7) N. S. Hassan, A. A. Jalil, S. Rajendran, N. F. Khusnun, M. B. Bahari, A. Johari, M. J. Kamaruddin, M. Ismail, *International Journal of Hydrogen Energy*, **52**, 420-441 (2024). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.068
- 8) H. Yu, Z. Shao, M. Hou, D. Yi, F. Duan, Y. Yang, *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 23, 2, 146-152 (2021). DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.02.020
- 9) W. Zhao, L. Luo, M. Cong, X. Liu, Z. Zhang, M. Bahri, B. Li, J. Yang, M. Yu, L. Liu, Y. Xia, N. D. Browning, W. Zhu, W. Zhang, A. I. Cooper, *Nat. Commun.*, **15**, 6482 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-50839-3
- 10) J. P. Hughes, J. Clipsham, H. Chavushoglu, S. J. Rowley-Neale, C. E. Banks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110709 (2021). DOI: 10.1016/j.rser.2021.110709

- 11) K. V. Kholin, E. A. Soloviev, P. Y. Enders, T. P. Sultanov, R. N. Mansurov, S. T. Minzanova, *High Energy Chemistry*, 57, 1, 213-217 (2023). DOI: 10.1134/S0018143923070214
- 12) M. M. Najafpour, S. I. Allakhverdiev, *International journal* of hydrogen energy, **37**, 10, 8753-8764 (2012). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.075
- 13) M. K. Kadirov, S. T. Minzanova, I. R. Nizameev, M. N. Khrizanforov, L. G. Mironova, K. V. Kholin, D. M. Kadirov, E. S. Nefed'ev, M. V. Morozov, A. T. Gubaidullin, Y. H. Budnikova, O. G. Sinyashin, *ChemistrySelect*, *4*, 16, 4731-4734 (2019). DOI: 10.1002/slct.201802955
- 14) S. T. Minzanova, V. F. Mironov, L. G. Mironova, I. R. Nizameev, K. V. Kholin, A. D. Voloshina, N. V. Kulik, N. G. Nazarov, V. A. Milyukov, *Chemistry of natural compounds*, 52, 26-31 (2016). DOI: 10.1007/s10600-016-1539-1
- 15) M. K. Kadirov, S. T. Minzanova, I. R. Nizameev, L. G. Mironova, I. F. Gilmutdinov, M. N. Khrizanforov, K. V. Kholin, A. R. Khamatgalimov, V. A. Semyonov, V. I. Morozov, D. M. Kadirov, A. R. Mukhametzyanov, Y. H. Budnikova, O. G. Sinyashin, *Inorganic Chemistry Frontiers*, 5, 4, 780-784 (2018). DOI: 10.1039/C7QI00770A
- 16) Y. Q. Zhang, R. Z. Liao, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19, 48, 32589-32596 (2017). DOI : 10.1039/C7CP06222B
- M. Jahan, Z. Liu, K. P. Loh, Advanced Functional Materials, 23, 43, 5363-5372 (2013). DOI: 10.1002/adfm.201300510
- 18) M. H. Miles, M. A. Thomason, *Journal of the Electrochemical Society*, **123**, 10, 1459 (1976). DOI: 10.1149/1.2132619
- 19) E. A. Moges, C. Y. Chang, M. C. Tsai, W. N. Su, B. J. Hwang, *EES Catalysis*, 1, 4, 413-433 (2023). DOI: 10.1039/D3EY00017F
- 20) В. С. Багоцкий, Основы электрохимии, Химия, Москва 1988. 400 с.
- 21) А.Г. Ощепков. Автореф. дисс. канд. хим. наук, Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН, Новосибирск, 2017. 23 с.

References

- A. H. Schrotenboer, A. A. Veenstra, M. A. uit het Broek, E. A. Ursavas, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112744 (2022). DOI: 10.1016/j.rser.2022.112744
- 2) M. Otto, K. L. Chagoya, R. G. Blair, S. M. Hick, J. S. Kapat, *Journal of Energy Storage*, **55**, 105714 (2022). DOI: 10.1016/j.est.2022.105714
- 3) M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180 (2021). DOI: 10.1016/j.rser.2021.111180
- 4) S. H. Lee, H. Kwon, S. Kim, J. Yun, E. Kim, G. Jang, D. W. Jeong, *Chemical Engineering Journal*, **495**, 153411 (2024). DOI: 10.1016/j.cej.2024.153411
- 5) S. Wang, A. Lu, C. J. Zhong, *Nano Convergence*, **8**, 1, 4 (2021). DOI: 10.1186/s40580-021-00254-x
- 6) A. Alamiery, *ChemPhysMater*, **3**, 1, 64-73 (2024). DOI: 10.1016/j.chphma.2023.09.002
- 7) N. S. Hassan, A. A. Jalil, S. Rajendran, N. F. Khusnun, M. B. Bahari, A. Johari, M. J. Kamaruddin, M. Ismail, *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 420-441 (2024). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.068
- 8) H. Yu, Z. Shao, M. Hou, D. Yi, F. Duan, Y. Yang, *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 23, 2, 146-152 (2021). DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.02.020
- 9) W. Zhao, L. Luo, M. Cong, X. Liu, Z. Zhang, M. Bahri, B. Li, J. Yang, M. Yu, L. Liu, Y. Xia, N. D. Browning, W. Zhu, W. Zhang, A. I. Cooper, *Nat. Commun.*, **15**, 6482 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-50839-3
- J. P. Hughes, J. Clipsham, H. Chavushoglu, S. J. Rowley-Neale, C. E. Banks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **139**, 110709 (2021). DOI:

10.1016/j.rser.2021.110709

- K. V. Kholin, E. A. Soloviev, P. Y. Enders, T. P. Sultanov, R. N. Mansurov, S. T. Minzanova, *High Energy Chemistry*, 57, 1, 213-217 (2023). DOI: 10.1134/S0018143923070214
- 12) M. M. Najafpour, S. I. Allakhverdiev, *International journal of hydrogen energy*, **37**, 10, 8753-8764 (2012). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.075
- M. K. Kadirov, S. T. Minzanova, I. R. Nizameev, M. N. Khrizanforov, L. G. Mironova, K. V. Kholin, D. M. Kadirov, E. S. Nefed'ev, M. V. Morozov, A. T. Gubaidullin, Y. H. Budnikova, O. G. Sinyashin, *ChemistrySelect*, *4*, 16, 4731-4734 (2019). DOI: 10.1002/slct.201802955
- 14) S. T. Minzanova, V. F. Mironov, L. G. Mironova, I. R. Nizameev, K. V. Kholin, A. D. Voloshina, N. V. Kulik, N. G. Nazarov, V. A. Milyukov, *Chemistry of natural compounds*, **52**, 26-31 (2016). DOI: 10.1007/s10600-016-1539-1
- 15) M. K. Kadirov, S. T. Minzanova, I. R. Nizameev, L. G. Mironova, I. F. Gilmutdinov, M. N. Khrizanforov, K. V. Kholin, A. R. Khamatgalimov, V. A. Semyonov, V. I. Morozov, D. M. Kadirov, A. R. Mukhametzyanov, Y. H.

Budnikova, O. G. Sinyashin, *Inorganic Chemistry Frontiers*, 5, 4, 780-784 (2018). DOI: 10.1039/C7QI00770A

- 16) Y. Q. Zhang, R. Z. Liao, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19, 48, 32589-32596 (2017). DOI : 10.1039/C7CP06222B
- M. Jahan, Z. Liu, K. P. Loh, Advanced Functional Materials, 23, 43, 5363-5372 (2013). DOI: 10.1002/adfm.201300510
- 18) M. H. Miles, M. A. Thomason, *Journal of the Electrochemical Society*, **123**, 10, 1459 (1976). DOI: 10.1149/1.2132619
- 19) E. A. Moges, C. Y. Chang, M. C. Tsai, W. N. Su, B. J. Hwang, *EES Catalysis*, 1, 4, 413-433 (2023). DOI: 10.1039/D3EY00017F
- 20) V. S. Bagotsky, *Fundamentals of Electrochemistry*, Chemistry, Moscow 1988. 400 p.
- 21) A.G. Oshchepkov. Abstract of Cand. of Chemical Sciences Dissertation, Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 2017. 23 p.

© Е. А. Соловьев – аспирант кафедры Нанотехнологии в электронике (НЭ), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (КНИТУ им. А. Н. Туполева); младший научный сотрудник лаборатории Физикохимической экологии (ФХЭ), Институт органической и физической химии им. А. Е. Арбузова (ИОФХ), КазНЦ РАН, Казань, Россия, evgeniy.solovev.anatolevich@mail.ru; **М. В. Морозов** – кандидат технических наук, доцент, кафедра НЭ, КНИТУ им. А. Н. Туполева, misha617@mail.ru; **Т. П. Султанов** – ассистент кафедры Физики, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ); лаборант-исследователь лаборатории ФХЭ, ИОФХ, КазНЦ РАН, sultanovtp05@mail.ru; **К. В. Холин** – кандидат химических наук, заведующий кафедрой Физики, КНИТУ; старший научный сотрудник лаборатории ФХЭ, ИОФХ, КазНЦ РАН, Казань, Россия, kholin06@mail.ru; **М. К. Кадиров** – доктор химических наук, профессор кафедры Физики, КНИТУ; ведущий научный сотрудник лаборатории ФХЭ, ИОФХ, КазНЦ РАН, казань, Росия, каборатории ФХЭ, ИОФХ, КазНЦ РАН, казань, росия, каборатория, каборатория, каборатория, каборатория, каборатори, каборатория, каборатория, кабо

© E. A. Soloviev – PhD-student of the Department of Nanotechnology in Electronics (NE), Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KNRTU named after A. N. Tupolev); Junior Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Ecology (PCE), A. E. Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry (IOPC), Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (KSC RAS), evgeniy.solovev.anatolevich@mail.ru; M. V. Morozov – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the NE department, KNRTU named after A. N. Tupolev, misha617@mail.ru; T. P. Sultanov – Assistant of the Department of Physics, Kazan National Research Technological University (KNRTU); Laboratory Assistant, the PCE laboratory, IOPC, KSC RAS, Kazan, Russia, sultanovtp05@mail.ru; K. V. Kholin – PhD (Chemistry Sci.), Head of the Department of Physics, KNRTU; Senior Researcher at the PCE Laboratory, IOPC, KSC RAS, kholin06@mail.ru; M. K. Kadirov – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor of the Department of Physics, KNRTU; Leading Researcher at the PCE laboratory, IOPC, KSC RAS, kamaka59@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию –08.03.25. Дата принятия рукописи в печать – 13.03.25.