

ОПТИМАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПАСТОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОУГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЫ И ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

Д.С. Толстогузов, С.В. Штин, К.Р. Смолякова, А.Н. Жанахова, К.В. Матвеев, Г.А. Хасанова, Е.И. Дубинина, Н.С. Некорыснова, А.С. Чернуха, В.К. Бежин, М.А. Паладий, А.М. Тарасов, Д.М. Галимов, Д.А. Жеребцов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия
✉ zherebtsov_da@yahoo.com

Аннотация. В статье рассмотрено влияние соотношения порошок – масло в составе пастовых электродов из композитов на основе стеклоуглерода на их поведение в растворе (0,1 М КСl, 0,005 М $K_3[Fe(CN)_6]$, 0,005 М $K_4[Fe(CN)_6]$). Полученные композитные наноматериалы исследовались методами рентгенофазового анализа, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального анализа. Рентгенофазовый анализ показал, что образец содержит графит, магнетит Fe_3O_4 и цементит Fe_3C . Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что частицы кристаллических фаз образуют агломераты размером от 0,1 до 3 мкм. Углеродные композиты измельчали и просеивали через сито 0,05 мм, после чего из полученного порошка готовили пасту для электрода с соотношением композит : вакуумное масло (мг : мг): 80 : 5, 80 : 10, 80 : 15, 80 : 20, 80 : 25, 80 : 30. Затем перемешивали до однородной массы и набивали в трубчатый электрод диаметром 3 мм. На основе сравнения спектров импеданса и вольтамперограмм показано, что оптимальным для работоспособности электродов соотношением композит:масло является 80:10 (масс). Обнаружен существенный дрейф свойств свежеприготовленных паст, который исключается их выдержкой перед использованием в течение суток. Показано решающее влияние наличия свежей поверхности перед каждым измерением.

Ключевые слова: стеклоуглерод, композитные наноматериалы, соотношение композит : масло, циклическая вольтамперометрия, спектр импеданса

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и Южно-Уральского государственного университета (соглашение №075-15-2022-1135).

Для цитирования: Оптимальный состав пастовых композитных электродов на основе стеклоуглеродной матрицы и оксидов железа / Д.С. Толстогузов, С.В. Штин, К.Р. Смолякова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 3. С. 161–170. DOI: 10.14529/chem240311

Original article
DOI: 10.14529/chem240311

OPTIMAL COMPOSITION OF PASTE COMPOSITE ELECTRODES BASED ON GLASSY CARBON MATRIX AND IRON OXIDES

D.S. Tolstoguzov, S.V. Shtin, K.R. Smolyakova, A.N. Zhanakhova, K.V. Matveev, G.A. Khasanova, E.I. Dubinina, N.S. Nekorysnova, A.S. Chernukha, V.K. Bezhin, M.A. Paladiy, A.M. Tarasov, D.M. Galimov, D.A. Zherebtsov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
✉ zherebtsov_da@yahoo.com

Abstract. The article considers the influence of the powder-oil ratio in the composition of paste electrodes, made of composites based on glassy carbon, on their behavior in a solution (0.1 M KCl, 0.005 M $K_3[Fe(CN)_6]$, 0.005 M $K_4[Fe(CN)_6]$). The obtained composite nanomaterials were studied by X-

© Толстогузов Д.С., Штин С.В., Смолякова К.Р., Жанахова А.Н., Матвеев К.В., Хасанова Г.А., Дубинина Е.И., Некорыснова Н.С., Чернуха А.С., Бежин В.К., Паладий М.А., Тарасов А.М., Галимов Д.М., Жеребцов Д.А., 2024.

ray phase analysis, transmission and scanning electron microscopy, and X-ray spectral analysis. X-ray phase analysis showed that the sample contained graphite, magnetite Fe_3O_4 , and cementite Fe_3C . The results of scanning electron microscopy showed that particles of crystalline phases formed agglomerates ranging in size from 0.1 to 3 μm . Carbon composites were crushed and sifted through a 0.05 mm sieve, after which a paste for the electrode was prepared from the resulting powder with the ratios of the composite to vacuum oil (in mg): 80 : 5, 80 : 10, 80 : 15, 80 : 20, 80 : 25, 80 : 30. Then it was stirred into a homogeneous mass and stuffed into a tubular electrode with the 3 mm diameter. Based on a comparison of the impedance spectra and voltammograms, it has been shown that the ratio of the composite to oil that is optimal for the electrode performance is 80:10 (mass). A significant drift of the properties of freshly prepared pastes has been discovered, which is excluded by keeping them for a day before use. The decisive influence of a fresh surface before each measurement has been shown.

Keywords: glassy carbon, composite nanomaterials, composite:oil ratio, cyclic voltammetry, impedance spectrum.

Acknowledgments. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and South Ural State University (Agreement No. 075-15-2022-1135).

For citation: Tolstoguzov D.S., Shtin S.V., Smolyakova K.R., Zhanakhova A.N., Matveev K.V., Khasanova G.A., Dubinina E.I., Nekorysnova N.S., Chernukha A.S., Bezhin V.K., Paladiy M.A., Tarasov A.M., Galimov D.M., Zherebtsov D.A. Optimal composition of paste composite electrodes based on glassy carbon matrix and iron oxides. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2024;16(3):161–170. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem240311

Введение

В последние десятилетия постоянно увеличивается нагрузка на окружающую среду, в частности, на гидросферу, загрязнение которой происходит за счет попадания в водные объекты различных веществ, как органической, так и неорганической природы. Существуют множество методов обнаружения органических соединений в воде, однако электрохимический анализ имеет преимущество в низкой стоимости, высокой скорости, высокой чувствительности и компактности оборудования.

Авторами [1–4] рассматривается специфика поведения многостенных углеродных нанотрубок в пастовых электродах на связке из парафина в количестве 15–30 %, при этом присутствие нанотрубок существенно улучшает прочность и электропроводность пасты, но оптимальным стало содержание 25 % парафина в электроде.

В качестве основного компонента композитов для пастовых электродов интересен стеклоуглерод, так как он обладает высокой химической стойкостью, электропроводностью, а также это обусловлено доступностью реагентов для его синтеза [5, 6]. Экспериментально была обнаружена характерная точка на графике зависимости удельного сопротивления от соотношения наполнитель:связка, которую можно использовать в дальнейшем для диагностики в качестве показателя оптимального состава угольной пасты [7]. Авторами [8, 9] рассмотрено влияние разных сортов графита на свойства пастовых электродов, приготовленные на их основе. Электроды из углеродной пасты применяются в равновесной потенциометрии и электрохимическом инверсионном анализе с использованием как вольтамперометрического, так и потенциометрического режимов. Различные модификации углеродных паст были применены в составе биосенсоров [10]. Также известно применение силиконового масла для получения электродов [11]. Электрод из смеси графитового порошка и силиконового масла в соотношении 70:30 (масс. %) показал увеличение как анодного, так и катодного пикового тока при анализе дофамина [12]. Модифицированные диоксидом титана и коллоидным золотом электроды из угольной пасты применялись для определения парацетамола и тирозиназы [13, 14]. Исследованы электроды с содержанием 10 % цеолита, 60 % графита и 30 % минерального масла [15]. Электрод из мезопористого углерода и минерального масла в соотношении 70:30 (масс. %) по сравнению с углеродными нанотрубками и электродами из графитовой порошковой пасты показал ускоренную кинетику при анализе аскорбиновой кислоты, мочевой кислоты, ацетаминофенола (парацетамола), адреналина, дофамина и H_2O_2 [16].

Можно сделать вывод, значения пикового тока связано с содержанием связки (минерального или силиконового масла или парафина), с сопротивлением электрода, а модификация оксидами железа привело к улучшения качеств электродов. Целью данной работы было исследование влияния соотношения наполнителя и минерального масла на сопротивление и рабочие качества композитных электродов на основе стеклоуглерода и оксидов железа.

Экспериментальная часть

На первом этапе синтезировали фталат железа (III) в соответствии с методикой [17–19]. Далее полученный фталат железа (III) применяли для синтеза углеродного композитного материала на основе новолачной фенолформальдегидной смолы. Для этого их смесь подвергали нагреванию до 900 °С [20–22]. В качестве образца сравнения был приготовлен стеклоуглерод по этой же схеме, но без введения фталата железа (III) [23, 24]. Подробности синтеза будут опубликованы отдельно.

Полученный композит исследовали методом рентгенофазового анализа с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии (JEOL JEM-2100F и JEOL JSM-7001F соответственно) и рентгеноспектрального анализа с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA X-max 80.

Далее рассмотрено поведение пастовых электродов с разным соотношением композит:масло, влияние электрического сопротивления на значения пикового анодного и катодного тока и потенциала на вольтамперограмме. Исследование проводили методом циклической вольтамперометрии (ЦВА) в растворе красной и желтой кровяных солей, так как на них протекает простой одноэлектродный переход Fe^{2+}/Fe^{3+} , на котором удобно тестировать электрохимический датчик [25].

Углеродные композиты измельчали и просеивали через сито 0,05 мм, после чего из полученного порошка готовили пасту для электрода с соотношением композит : вакуумное масло (мг:мг): 80 : 5, 80 : 10, 80 : 15, 80 : 20, 80 : 25, 80 : 30. Затем перемешивали до однородной массы и набивали в трубчатый электрод диаметром 3 мм (рис. 1). Корпус электрода изготовлен из полипропилена, а плотно вставленный в него стержень диаметром 3 мм – из нержавеющей стали.



Рис. 1. Трубчатый электрод в сборе

Для электрохимического исследования использовался потенциостат-гальваностат Р-150Х. Электрохимическая ячейка подключалась по трёхэлектродной схеме. При этом противозлектродом являлся стеклоуглеродный стакан, а электродом сравнения – хлорид-серебряный электрод, параметры съёмки: от –0,4 до +0,8 В, скорость развертки – 50 мВ/с, количество циклов 1. Вольтамперограммы снимались в модельном водном растворе: 0,1 М КСl, 0,005 М $K_3[Fe(CN)_6]$, 0,005 М $K_4[Fe(CN)_6]$.

Электрическое сопротивление измерялось на потенциостате Р-45Х с приставкой для проведения спектроскопии импеданса. Для измерений использовался водный раствор: 0,1 М КСl, 0,005 М $K_3[Fe(CN)_6]$, 0,005 М $K_4[Fe(CN)_6]$. Параметры съёмки: частота от 50 кГц до 1 Гц, постоянное токовое смещение 0 В, скорость развертки 50 мВ/с. По результатам исследования были найдены значения активного и реактивного сопротивления, построены годографы Найквиста. Важным критерием выбора материала была также консистенция смеси твердое : масло и её способность удерживаться в трубчатом электроде.

Результаты и обсуждение

Дифрактограмма полученного композита приведена на рис. 2. Рентгенофазовый анализ позволил заключить, что образец содержит графит, магнетит Fe_3O_4 , цементит Fe_3C и железо Fe

в количествах, указанных в табл. 1. По результатам анализа основной кристаллической железо-содержащей фазой являлось элементарное Fe. Общее содержание Fe в композите определено методом сжигания гравиметрически и составляло 5,3 %.

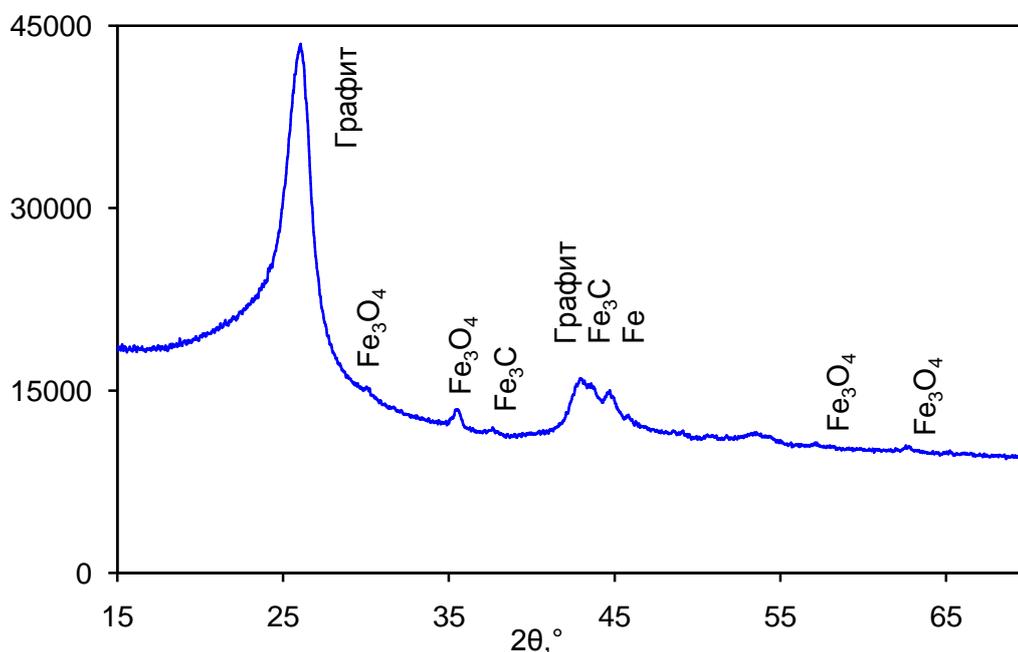


Рис. 2. Дифрактограмма композита

Таблица 1
Фазовый состав композита, масс. %

| | |
|--------------------------------|------|
| Графит | 85 |
| Fe ₃ O ₄ | 0,66 |
| Fe ₃ C | 0,04 |
| Fe | 4,6 |
| Стеклоуглерод | 10 |

Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что частицы кристаллических фаз образуют агломераты размером от 0,1 до 3 мкм (рис. 3а, б). Просвечивающая электронная микроскопия выявляет частицы, содержащие железо, размером 15–30 нм, причем эти частицы окружены хорошо упорядоченными слоями графита толщиной 10–20 нм (рис. 3в).

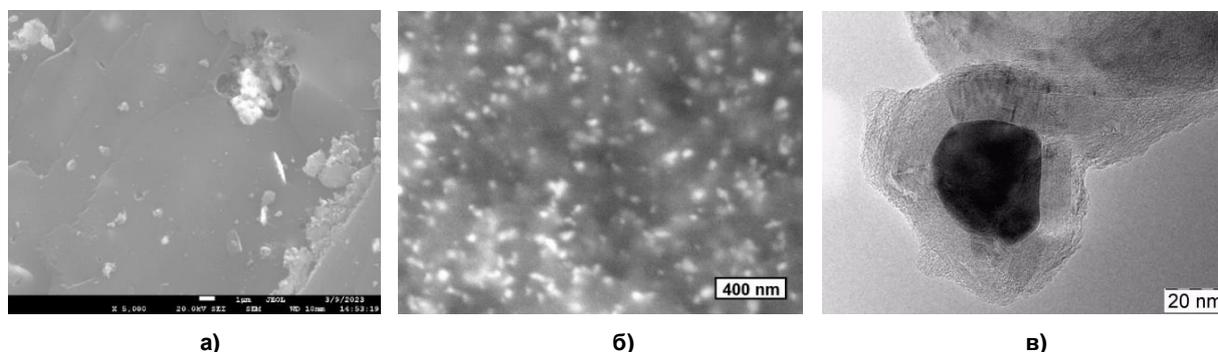


Рис. 3. Морфология образца по данным электронной микроскопии: сканирующей во вторичных (а) и отраженных (б) электронах, просвечивающей электронной микроскопии (в)

На рис. 4 показана модель распределения масла между зёрнами композита. При увеличении соотношения масла к композиту увеличиваются расстояния между отдельными зёрнами. Необ-

ходимо добавить, что часть масла сорбируется на зёрнах, а остальное количество находится в промежутках между зёрнами.

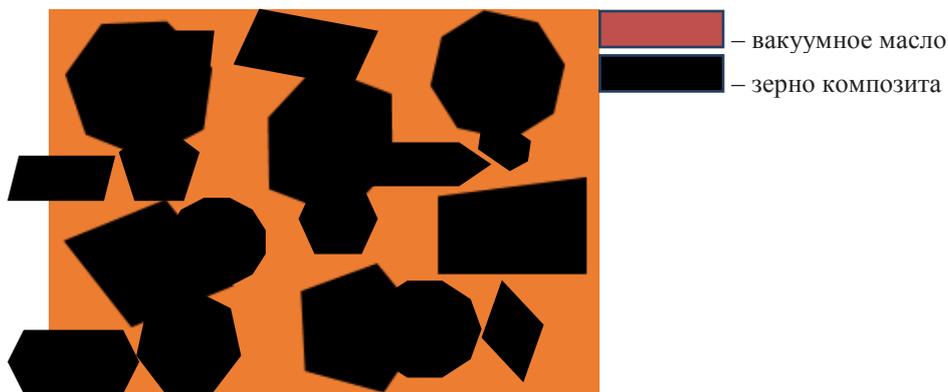


Рис. 4. Схема распределения масла между зёрнами

Методом циклической вольтамперометрии при скорости сканирования 50 мВ/с были получены вольтамперограммы материалов с разным содержанием масла (рис. 5). Токи пиков окисления и восстановления пары $Fe^{+2/+3}$ возрастают с ростом скорости сканирования, что является следствием диффузионного режима процесса.

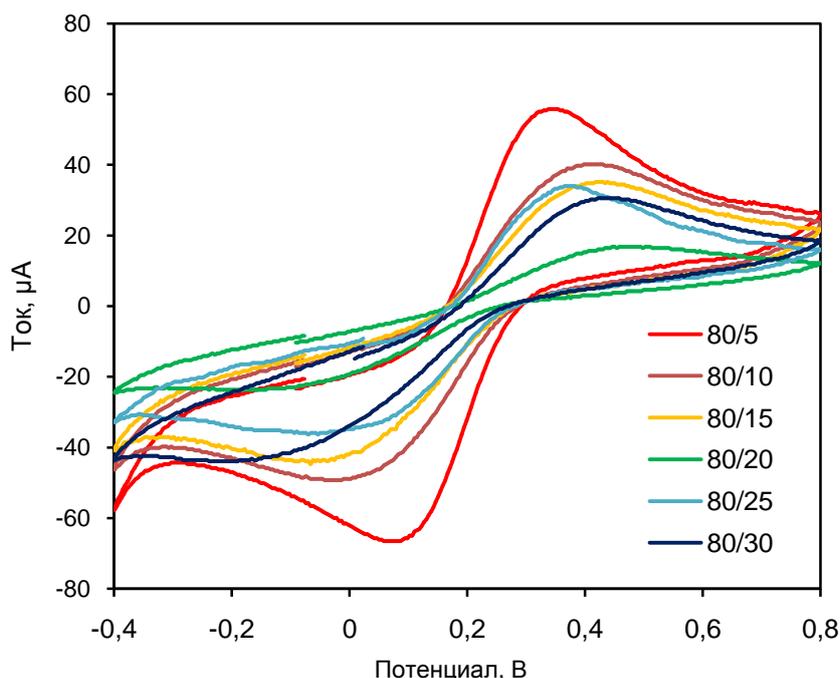


Рис. 5. Вольтамперограммы образцов в растворе $Fe^{+2/+3}$.
Числа обозначают соотношение твердое : масло

Из вольтамперограмм видно, что с ростом соотношения твердое : масло происходит рост пиковых токов и снижение разности потенциалов. По результатам вольтамперометрии были получены зависимости пиковых значений величин от содержания масла (рис. 6, 7).

Как можно заметить, при увеличении содержания масла в смеси происходит уменьшение катодного и анодного токов. При увеличении содержания масла в композите величина отклика снижается. Это значит, что при попытке обнаружить малые примеси веществ в растворе электрод может быть нечувствителен и вещество не будет обнаружено. Наибольшие значения пиковых токов были у смесей 80 : 5 и 80 : 10.

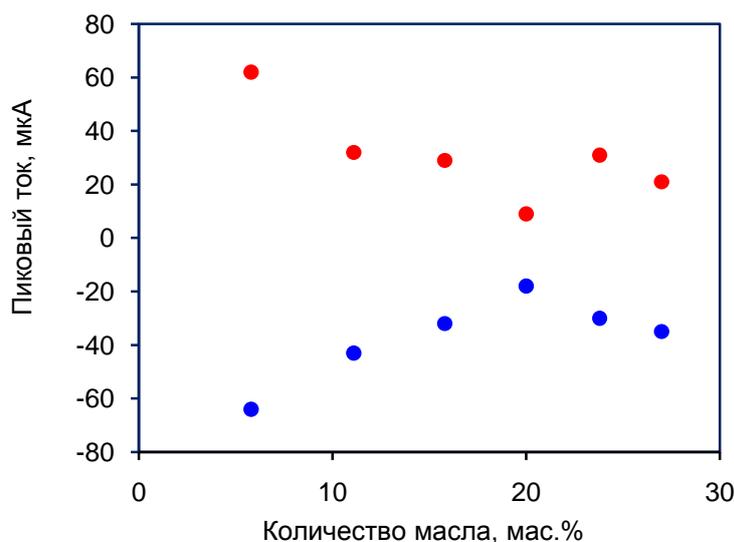


Рис. 6. Зависимость значений пикового тока от количества масла в смеси

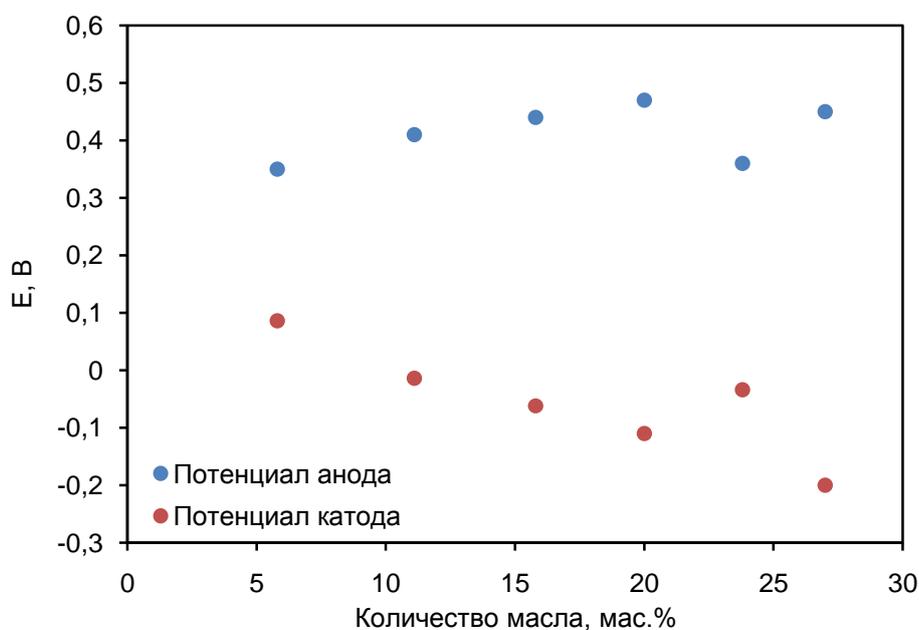


Рис. 7. Зависимость пикового анодного и катодного потенциала от количества масла в смеси

Из рис. 7 следует, что при увеличении количества масла в смеси происходит увеличение пикового потенциала окисления. Для сравнения: при стандартных условиях электродный потенциал реакции $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} + e = [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ составляет 0,36 В [26]. Из полученных материалов по данному критерию подходящими оказались смеси 80 : 5 (0,35 В), 80 : 10 (0,41 В) и 80 : 25 (0,36 В). Существенные отклонения от справочного значения могут означать, что происходят побочные процессы, которые могут оказывать влияние на определение аналитов в воде электрохимическими методами.

Разность потенциалов окисления и восстановления увеличивается при увеличении содержания масла в смеси. Данная величина характеризует обратимость окислительно-восстановительного процесса превращения желтой кровяной соли в красную. Чем меньше это значение, тем более обратимо происходит процесс, т. е. электрод не оказывает влияния на проте-

кающие электрохимические процессы, является инертным к ним. В данном случае наименьшее значение имеют смеси 80:5 (0,26 В) и 80:10 (0,42В).

Из полученных диаграмм Найквиста для смесей (рис. 8) видно, что с увеличением содержания масла в смеси увеличиваются действительная и мнимая составляющая сопротивления (табл. 2). Мнимая составляющая сопротивления (реактивное сопротивление, $R_{\text{реакт}}$) определялась по экстремуму в верхней точке, значения $\Delta R_{\text{актив}}$ (разность активных сопротивлений) определялись по разнице между начальной и конечной точками действительного сопротивления, определяющихся по крайним точкам диаграммы. Также в табл. 2 указаны сопротивления электродов, определённые по мультиметру.

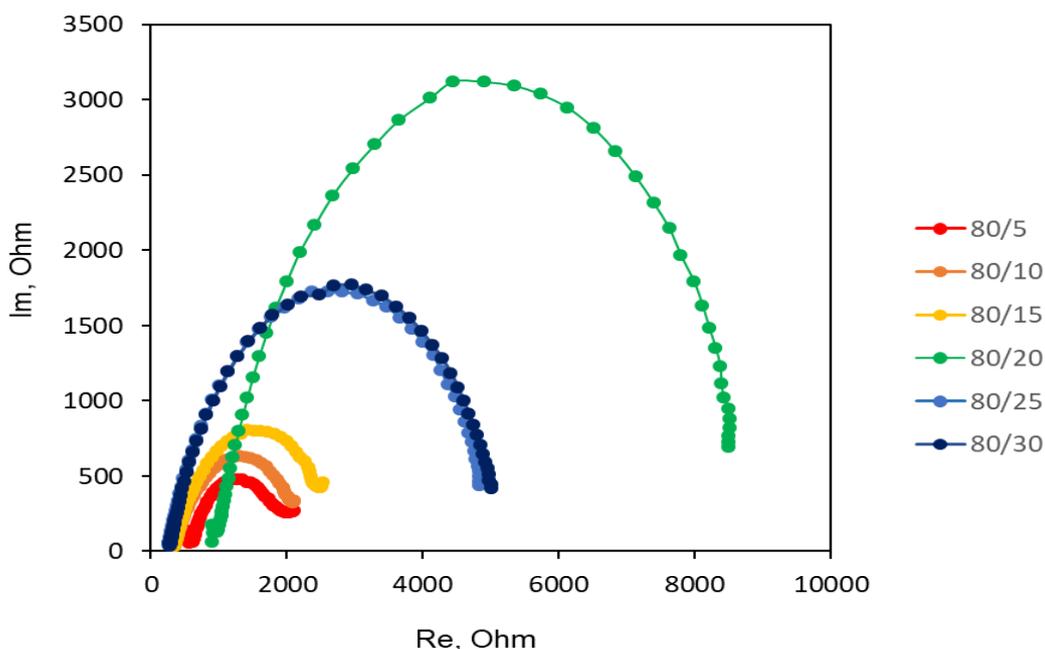


Рис. 8. Диаграммы Найквиста для пастовых электродов.
Числа обозначают соотношение твердое:масло

Таблица 2

Показатели комплексного сопротивления композита

| Соотношение композит:масло (масс.) | Сопротивление, Ом | Импеданс, Ом | |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------|
| | | $\Delta R_{\text{актив}}$ | $R_{\text{реакт}}$ |
| 80–5 | 1500 | 1541 | 476 |
| 80–10 | 60 | 1771 | 629 |
| 80–15 | 25 | 2185 | 804 |
| 80–20 | 1500 | 7614 | 3119 |
| 80–25 | 30 | 4565 | 1724 |
| 80–30 | 40 | 4730 | 1768 |

Исходя из полученных результатов спектроскопии импеданса, можно сделать вывод, что малыми значениями сопротивления обладали смеси 80 : 5 и 80 : 10. С дальнейшим увеличением содержания масла наблюдается пропорциональный рост сопротивления. Исключением является смесь 80 : 20, которая обладает наибольшим сопротивлением. Это отразилось и в наименьшем значении пиковых токов (см. рис. 6). Вероятно, при приготовлении данного электрода в пасту попал воздушный пузырь, резко увеличивший сопротивление. Можно установить высокую корреляцию между активным сопротивлением и токами в растворе $\text{Fe}^{+2/+3}$ (рис. 9). Измерять сопротивления композита мультиметром не имеет большого значения, так как не наблюдается зависимости между количеством масла и значением измеренного сопротивления.

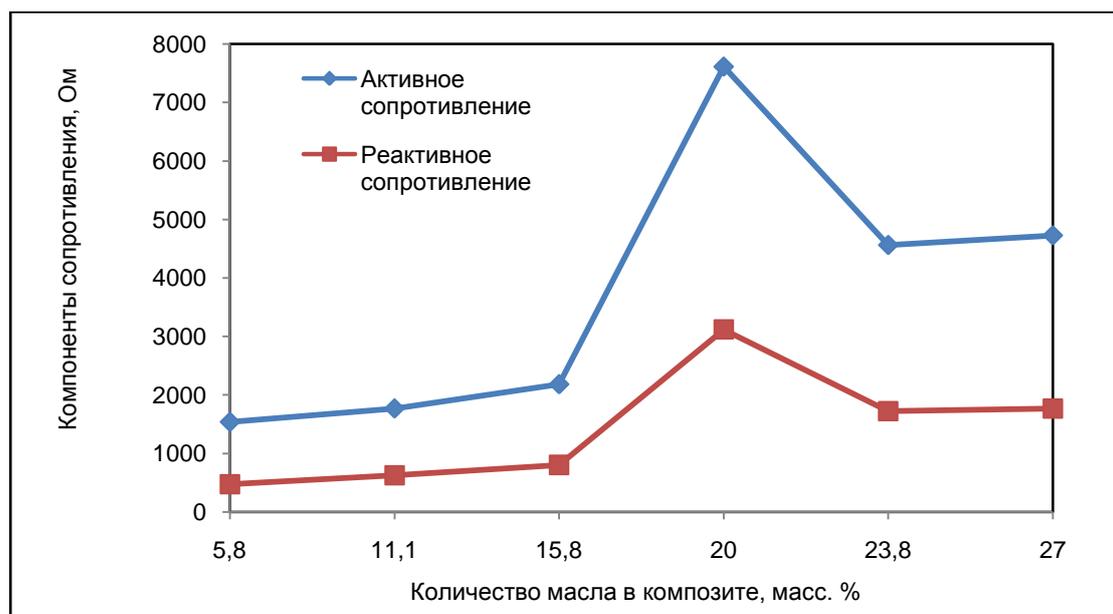


Рис. 9. Зависимость токов окисления и восстановления в растворе $Fe^{+2/+3}$ от активного и реактивного сопротивления электрода

Ещё один показатель для работы электрода – это консистенция получающейся электродной массы. При повышении содержания масла повышается текучесть массы. Масса 80 : 5 представляет собой почти сыпучий порошковый материал, не способный при набивке формы удерживаться в ней. По данному показателю наиболее подходящий электрод имеет отношение 80 : 10.

Заключение

В работе был исследован стеклоуглеродный композитный материал, содержащий Fe, Fe_3O_4 и Fe_3C . Общее содержание Fe в композите составляло 5,3 масс. %. Для выбора наиболее чувствительных и технологичных смесей с разным содержанием масла проводился анализ их электрохимического поведения в смеси красной и желтой кровяной соли, а также построены их диаграммы Найквиста. Были сравнены такие критерии, как значения пикового тока и пикового потенциала, величина сопротивления по спектроскопии импеданса, и такой показатель, как консистенция смеси. Из всех изученных смесей по данным критериям наиболее подходящей оказалась смесь 80 : 10. Данная смесь по критериям сопротивления и тока незначительно отличалась в худшую сторону от смеси 80 : 5, но по критерию консистенции она качественно превосходила ее. Таким образом, опробованы критерии для подбора пастовых электродов и найдено оптимальное соотношение твердое : масло для предложенного композитного материала. Низкое активное сопротивление является важным параметром при выборе пастового электрода. Причем измерять сопротивление, как один из важных показателей качества смесей, необходимо с помощью спектроскопии импеданса.

Список источников

1. Prause M., Schulz H. J., Wagler D. // *Acta biotechnologica*. 1984. V. 4, No. 2. P. 143. DOI: 10.1002/abio.370040210
2. Ashrafi A., Jokar M., Nafchi A.M. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. V. 108. P. 444. DOI: 10.3390/molecules24122215
3. Moscone D., D'Ottavi D., Compagnone D., Palleschi G., Amine A. // *Analytical Chemistry*. 2001. V. 73, No. 11. P. 2529. DOI: 10.1021/ac001245x
4. Shahrokhian S., Fotouhi L. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. V. 123, No. 2. P. 942. DOI: 10.1016/j.snb.2006.10.053
5. Yamada S., Sato H. // *Nature*. 1962. V. 193, No. 4812. P. 261. DOI: 10.1038/193261b0
6. Sharma S. // *Materials*. 2018. V. 11, No. 10. P. 1857. DOI: 10.3390/ma11101857

7. Mikysek T., Švancara I., Kalcher K. et al. // Analytical chemistry. 2009. V. 81, No. 15. P. 6327. DOI: 10.1021/ac9004937
8. Švancara I., Hvizdalová M., Vytřas K., Kalcher K., Novotný R. // Electroanalysis. 1996. V. 8, No. 1. P. 61. DOI: 10.1002/elan.1140080113
9. Vytřas K., Švancara I., Metelka R. // Journal of the Serbian Chemical society. 2009. V. 74, No. 10. P. 1021. DOI: 10.2298/JSC0910021V
10. Švancara I., Zima J., Schachl K. // Scientific papers of the University of Pardubice. Series A, Faculty of Chemical technology. 4 (1998). 1999.
11. Švancara I., Schachl K. The testing of unmodified carbon paste electrodes // Chemické listy. 1999. V. 93, No. 8.
12. Chandra U., Swamy B.E.K., Gilbert O., Pandurangachar M., Sherigara B.S. // International Journal of Electrochemical Science. 2009. V. 4, No. 10. P. 1479.
13. Walcarius A., Mariaulle P., Lamberts L. // Journal of Solid State Electrochemistry. 2003. V. 7. P. 671. DOI: 10.1007/s10008-003-0369-9
14. Koç Y., Morali U., Erol S., Avci H. // Turkish Journal of Chemistry. 2021. V. 45, No. 6. P. 1895. DOI: 10.3906/kim-2105-55
15. Liu S., Yu J., Ju H. // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2003. V. 540. P. 61. DOI: 10.1016/S0022-0728(02)01276-7
16. Zhu L., Tian C., Zhu D. et al. // Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis. 2008. V. 20, No. 10. P. 1128. DOI: 10.1002/elan.200704162
17. Dekanski A., Stevanović J., Stevanović R. et al. // Carbon. 2001. V. 39, No. 8. P. 1195. DOI: 10.1016/s0008-6223(00)00228-1
18. Shigemitsu T., Matsumoto G., Tsukahara S. Electrical properties of glassy-carbon electrodes // Medical and Biological Engineering and Computing. 1979. V. 17. P. 465. DOI: 10.1007/bf02447059
19. Afkhami A., Shirzadmehr A., Madrakian T. et al. // Talanta. 2015. V. 131. P. 548. DOI: 10.1016/j.talanta.2014.08.004
20. Manjunatha K.G., Kumara Swamy B.E., Madhuchandra H.D. et al. // Chemical Data Collections. 2021. V. 31. P. 100604. DOI: 10.1016/j.cdc.2020.100604
21. Способ получения фталата железа (II): пат. 2357950 Рос. Федерация № 2007133627/04; заявл. 07.09.2007; опубл. 10.06.2009.
22. Bobtelsky M., Bar-Gadda I. // Analytica Chimica Acta. 1953. V. 9. P. 446. DOI: 10.1016/s0003-2670(01)80798-4
23. Mikysek T., Stoes M., Jovanovski V. et al. // Sensing in electroanalysis. 2011. V. 6. P. 157.
24. Mikysek T., Stočes M., Švancara I. et al. // RSC advances. 2012. V. 2, No. 9. P. 3684. DOI: 10.1039/C2RA20202F
25. Švancara I., Vytřas K., Barek J., Zima J. // Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2001. V. 31, No. 4. P. 311. DOI: 10.1080/20014091076785
26. Сухотин А.М. Справочник по электрохимии. Л.: Химия, 1981. 488 с.

Толстогузов Дмитрий Сергеевич – аспирант, инженер кафедры материаловедения и физико-химии материалов, младший научный сотрудник лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: tolstoguzov.dim@yandex.ru

Штин Светлана Валентиновна – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, доцент кафедры «Материаловедение и физико-химии материалов», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: shtinsv@susu.ru

Смолякова Ксения Романовна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: ka_satka@inbox.ru

Жанахова Анастасия Николаевна – инженер кафедры «Экология и химическая технология», инженер лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: neudachina.a@yandex.ru.

Матвеев Константин Витальевич – лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, студент кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: konstmatv2003@gmail.ru

Хасанова Гузель Айнуровна – студент кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: guzelhasanova@gambler.ru

Дубинина Евгения Игоревна – студент кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: evaigorevna17@mail.ru

Некорыснова Надежда Сергеевна – студент кафедры «Экология и химическая технология», лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: nadin5004@mail.ru.

Чернуха Александр Сергеевич – кандидат химических наук, доцент кафедры «Материаловедения и физико-химии материалов», доцент кафедры «Экология и химическая технология», научный сотрудник лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: chernukhaas@susu.ru

Бежин Владислав Константинович – студент кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: pek589@gmail.com

Паладий Мария Алексеевна – студент кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: 3217234m@gmail.com.

Тарасов Артём Михайлович – студент кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: tarasov_a02@mail.ru.

Галимов Дамир Муратович – инженер кафедры «Экология и химическая технология», научный сотрудник НОЦ «Нанотехнологии», научный сотрудник УНИД, лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: galimovdm@susu.ru.

Жеребцов Дмитрий Анатольевич – доктор химических наук, старший научный сотрудник кафедры материаловедения и физико-химии материалов, старший научный сотрудник лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации. Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: zherebtsov_da@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2024 г.

The article was submitted 16 April 2024.