

ПОЛУЧЕНИЕ СТЕКЛОУГЛЕРОДНЫХ МИКРОСФЕР ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

К.В. Матвеев[✉], В.К. Бежин, Н.С. Гейц, Д.А. Жеребцов
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия
[✉] konstmatv2003@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрена новая методика получения стеклоуглеродных микросфер в растворах, содержащих фурфуроловый спирт, этиленгликоль, изооктилфенолдекаэтиленгликоль (ОП-10) и серную кислоту, приведена морфология микросфер, а также результаты их электрохимического тестирования в растворе 0,1 М КСl, 0,005 М $K_3[Fe(CN)_6]$, 0,005 М $K_4[Fe(CN)_6]$. С помощью бесконтактного термометра была установлена зависимость между температурой раствора в процессе синтеза (выделяющейся в ходе теплотой реакции поликонденсации) и объемом добавляемой кислоты. Полученные в растворе полимерные микросферы отмывались, сушились и прокаливались при температуре 900 °С. Полученные материалы исследовались методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного элементного анализа. Элементный анализ показал, что материалы содержат около 98 % углерода, а также менее 2 % калия, меди, кислорода, серы и железа. Сканирующая электронная микроскопия показала, что микросферы имеют правильную сферическую форму, развитую поверхность и диаметр от 0,5 до 10 мкм. На основании данных о характерных размерах микросфер, определенных методом динамического рассеяния света, были построены зависимости их размеров от соотношения реагентов при синтезе. На основе микросфер готовили пасту для электрода с массовым соотношением микросферы : вакуумное масло = 80 : 10. Данную смесь перемешивали до однородной пасты и набивали в трубчатый электрод диаметром 3 мм. Методом циклической вольтамперометрии определены значения пикового тока и пикового потенциала электрода с чистыми микросферами, а для лучшего образца – еще и с добавлением гексаферрита бария как электрохимического катализатора. Из девятнадцати исследованных растворов для синтеза наиболее перспективным является раствор, содержащий 100 мл этиленгликоля, 5 мл фурфуролового спирта, 5 мл ОП-10, 50 мл серной кислоты.

Ключевые слова: стеклоуглерод, микросферы, электрохимия

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: Получение стеклоуглеродных микросфер для электрохимического анализа / К.В. Матвеев, В.К. Бежин, Н.С. Гейц, Д.А. Жеребцов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 3. С. 152–160. DOI: 10.14529/chem240310

Original article
DOI: 10.14529/chem240310

PREPARATION OF GLASSY CARBON MICROSPHERES FOR USE IN ELECTROCHEMICAL ANALYSIS

K.V. Matveev[✉], V.K. Bezhin, N.S. Geits, D.A. Zhrebtsov
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
[✉] konstmatv2003@gmail.com

Abstract. The article considers a new method for producing glassy carbon microspheres in solutions containing furfuryl alcohol, ethylene glycol, iso-octylphenol decaethylene glycol (OP-10) and sulfuric acid. The morphology of the microspheres is presented, as well as the results of their electrochemical testing in a solution of 0.1 M KCl, 0.005 M $K_3[Fe(CN)_6]$, 0.005 M $K_4[Fe(CN)_6]$. Using a non-contact thermometer, the dependence of the solution temperature during synthesis (the heat released during the

polycondensation reaction) on the volume of added acid was established. The polymer microspheres obtained in the solution were washed, dried, and calcined at 900 °C. The obtained materials were investigated using scanning electron microscopy and X-ray fluorescence elemental analysis. The elemental analysis showed that the materials contained about 98 % carbon, as well as less than 2 % potassium, copper, oxygen, sulfur, and iron. Scanning electron microscopy revealed that the microspheres had a regular spherical shape, well-developed surface and a diameter ranging from 0.5 to 10 microns. On the basis of the data summarizing the characteristic sizes of the microspheres determined by dynamic light scattering, the dependences of their sizes on the ratio of reagents during synthesis were constructed. The microspheres were used for preparation of the paste for an electrode with a mass ratio of microspheres : vacuum oil = 80 : 10. This mixture was stirred into a homogeneous paste and stuffed into a tubular electrode with the 3 mm diameter. The peak current and peak potential values of the electrode with pure microspheres were determined using cyclic voltammetry, with addition of barium hexaferrite as an electrochemical catalyst for the best sample. Among the nineteen solutions studied during synthesis, the most promising is the solution containing 100 mL of ethylene glycol, 5 mL of furfuryl alcohol, 5 mL of OP-10, and 50 m> of sulfuric acid.

Keywords: glassy carbon, microspheres, electrochemistry

Acknowledgments. This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation and South Ural State University (agreement №075-15-2022-1135).

For citation: Matveev K.V., Bezhin V.K., Geits N.S., Zhrebtsov D.A. Preparation of glassy carbon microspheres for use in electrochemical analysis. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2024;16(3):152–160. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem240310

Введение

В связи с возрастанием антропогенной нагрузки на окружающую среду с каждым годом происходит накопление и концентрирование загрязняющих веществ в среде обитания живых организмов. Существует множество методов обнаружения вредных веществ в воде, однако электрохимический анализ имеет ряд преимуществ: низкая стоимость, высокая скорость анализа, чувствительность и компактность оборудования. Открытие углеродных нанотрубок (УНТ) и нановолокон привело к их использованию в таких областях, как электрохимия, адсорбция, катализ, хранение водорода и электроника [1]. Среди нанообъектов выделяются наносферы разного состава, методика их получения описана из таких прекурсоров, как глюкоза и фурфуроловый спирт [2,3], 3-аминофенол с формальдегидом [4], 3-аминофенол с гексаметилентетрамином [5] и другие [6], также была описана методика допирования углеродных наносфер никелем [7]. Углеродные наносферы представляют особый интерес, так как они имеют важное применение в составе пастовых электродов [8]. Известно применение модифицированных углеродных наносфер для определения широкого спектра органических веществ: глюкозы [9, 10], допамина [11, 12], различных антибиотиков, в том числе тобрамицина [13] и триметоприма [14], таких лекарственных веществ, как ацетаминофен [15, 16] и прогестерон [17], а также красителя родамина Б [18] и мальтола [19]. Из неорганических веществ, определяемых с использованием углеродных наносфер, можно выделить перекись водорода [20]. Помимо датчиков, наносферы также находят применение в ионисторах [21]. В данной работе было исследовано влияние параметров синтеза на размер углеродных наносфер, получаемых с использованием фурфуролового спирта, так как этот спирт является дешёвым однокомпонентным прекурсором для реактопласта, способного превращаться при прокаливании в стеклоуглерод. В качестве материала, которым допируются наносферы, был использован гексаферрит бария, на основе которого были созданы датчики для определения таких соединений, как ацетаминофен [22] и озон [23].

Экспериментальная часть

Для синтеза эмульсии (и далее – суспензии) полимера на основе фурфуролового спирта был избран раствор на основе воды или этиленгликоля. Роль катализатора поликонденсации играла соляная или серная кислота, а в качестве неионогенного поверхностно активного вещества выступал изооктилфенолдекаэтиленгликоль (ОП-10). Все реактивы были квалификации «хч». Реакцию поликонденсации проводили в полипропиленовой посуде емкостью 500 мл при переменном количестве компонентов (табл. 1, 2).

Составы растворов для синтеза образцов (серия 1)

Растворитель [мл]	Объем ФС, мл	Количество ОП-10, г	Объем кислоты, мл	Выход микросфер, %
Вода 150	5	0,1	100 HCl	1,2
Вода 150	5	0,1	50 HCl + 10 H ₂ SO ₄	1,5
Вода 150	5	1	50 HCl	1,6
Вода 150	5	1	100 HCl	1,7
Этиленгликоль 100	20	2,5	50 HCl	3,4
Этиленгликоль 100	5	5	50 HCl	4,5
Этиленгликоль 100	5	5	50 H ₂ SO ₄	15,1
Этиленгликоль 100	5	20	100 HCl	2,6
Этиленгликоль 100	20	5	50 HCl	6,3
Этиленгликоль 100	10	5	50 HCl + 10 H ₂ SO ₄	3,4
Этиленгликоль 100	10	2,5	50HCl	4,7

К навеске поверхностно активного вещества добавлялся растворитель (150 мл воды или 100 мл этиленгликоля), затем приливался фурфуроловый спирт. После этого смесь перемешивалась без нагревания и затем небольшими порциями вливалась кислота в течение 10–60 минут. Цвет при этом переходил от бледно-желтого до черно-коричневого (рис. 1). С помощью бесконтактного термометра определяли температуру раствора каждые 2–3 минуты. Через сутки часть образцов коагулировала в крупные капли, часть образовала донный слой полимера, другая осталась в виде эмульсии полимера. В случае низкого содержания кислоты в исходной смеси ряд растворов оставался мало измененным в течение часа, поэтому в них была добавлена дополнительная порция кислоты.

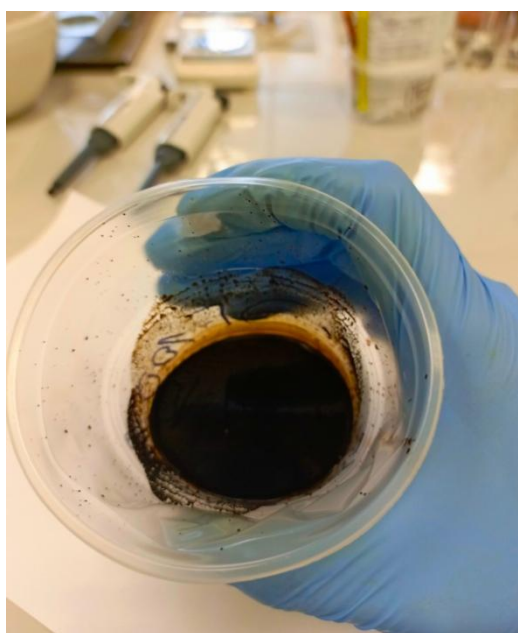


Рис. 1. Цвет продукта через сутки после синтеза

Затем полученная суспензия полимера выдерживалась при 80 °С в течение 2–7 суток, после чего трижды промывалась водой и центрифугировалась в течение 5 мин при 8000 оборотов в минуту. После этого образец переносился в стеклянную склянку, высушивался и прокаливался при 900 °С в защитной атмосфере. Полученный стеклоуглеродный материал исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (Jeol JSM-7001F) и рентгенофлуоресцентного анализа с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA X-max 80.

Поскольку опыты с водой в качестве растворителя, а также с соляной кислотой в качестве катализатора дали в большинстве своем слой полимера вместо эмульсии, было принято решение скорректировать состав и поставить синтез ещё 8 образцов (табл. 2). Серная кислота имеет то преимущество, что не требует улавливания коррозионноактивных паров при выдержке при 80 °С. Далее название образцов было сформировано по следующей схеме: буквы В или ЭГ относятся к типу растворителя – вода или этиленгликоль, следующее за буквами число – к объему растворителя, затем объем фурфуролового спирта, объем ОП-10 и объем кислоты. Например, 100ЭГ-3ФС-3ОП-30H₂SO₄ или в случае растворов на основе этиленгликоля (серия 2) – еще короче: 100ЭГ-3-3-30. Можно отметить, что выход микросфер максимален в двух сериях при составе ЭГ100-5-5-50 и ЭГ100-8-3-30.

Таблица 2

Составы растворов для синтеза образцов (серия 2)

Растворитель [мл]	Объем ФС, мл	Количество ОП-10, г	Объем серной кислоты, мл	Выход микросфер, %
Этиленгликоль 100	3	3	30	2,3
Этиленгликоль 100	3	8	30	4,7
Этиленгликоль 100	8	3	30	7
Этиленгликоль 100	8	8	30	2,1
Этиленгликоль 100	3	3	80	0
Этиленгликоль 100	3	8	80	0
Этиленгликоль 100	8	3	80	0
Этиленгликоль 100	8	8	80	0,1

Для серии 2 было проведено измерение размера частиц суспензии полимера методом динамического рассеяния света с помощью Photocor Compact-Z, ООО «Фотокор».

Качество пастовых электродов, в том числе значения пикового анодного и катодного тока и потенциала, определяли методом циклической вольтамперометрии (ЦВА) в растворе красной и желтой кровяных солей, так как на них протекает простой одноэлектродный переход Fe^{2+/3+}, на котором удобно тестировать электродный материал [24, 25].

Для электрохимического исследования использовался потенциостат-гальваностат Р-150Х. Электрохимическая ячейка подключалась по трёхэлектродной схеме. При этом противэлектродом являлся стеклоглеродный стакан, а электродом сравнения – хлорид-серебряный электрод, параметры съёмки: от –0,4 до +0,8 В (относительно ХСЭ), скорость развертки – 50 мВ/с, количество циклов – 3. Вольтамперограммы снимались в водном растворе с 0,1 М КСl, 0,005 М К₃[Fe(CN)₆] и 0,005 М К₄[Fe(CN)₆].

Обсуждение результатов

Для двух серий синтеза были построены зависимости температуры от объема серной кислоты, добавляемой порциями по 3 мл (рис. 2, 3). Обе они имеют схожий экстремальный вид, свидетельствующий о том, что через 20–25 минут достигается значительная полнота реакции, так что новые порции кислоты не вызывают дальнейшего роста температуры. Впрочем, следовало бы учесть еще и теплоту гидратации (сольватации) кислоты. Из двух графиков следует, что, как и должно следовать из констант скорости и из закона действующих масс, увеличение концентраций ФС и кислоты приводит к увеличению выделения теплоты и, соответственно, к росту температуры. ОП-10 практически не влияет на скорость реакции.

Результаты сканирующей электронной микроскопии прокаленных продуктов показали, что частицы имеют развитую поверхность и форму правильных сфер диаметром от 0,5 до 10 мкм (рис. 4). Состав образцов близок к ожидаемому для чистого стеклоглерода (табл. 3). Примеси металлов имеют случайное происхождение. Важно, что кислород и сера достаточно полно удаляются.

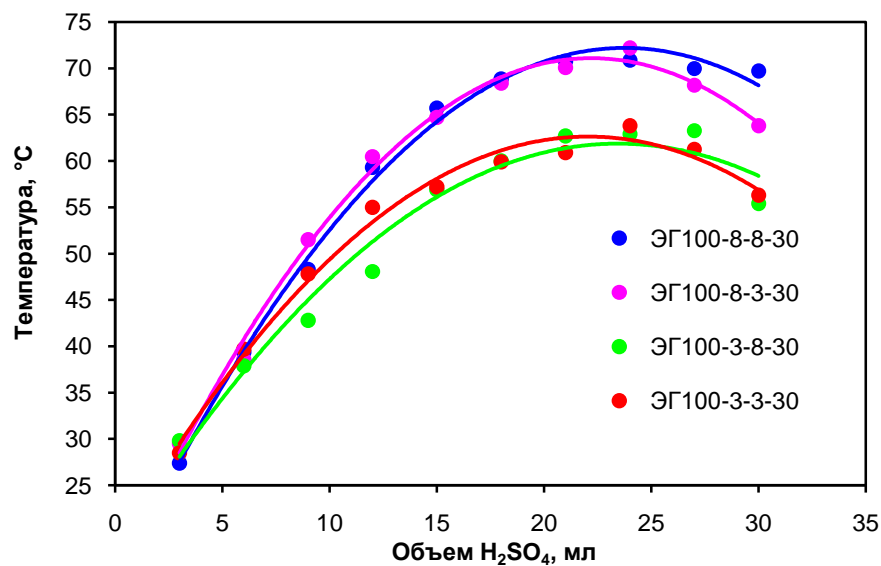


Рис. 2. Зависимость температуры от объема добавляемой серной кислоты (серия 1)

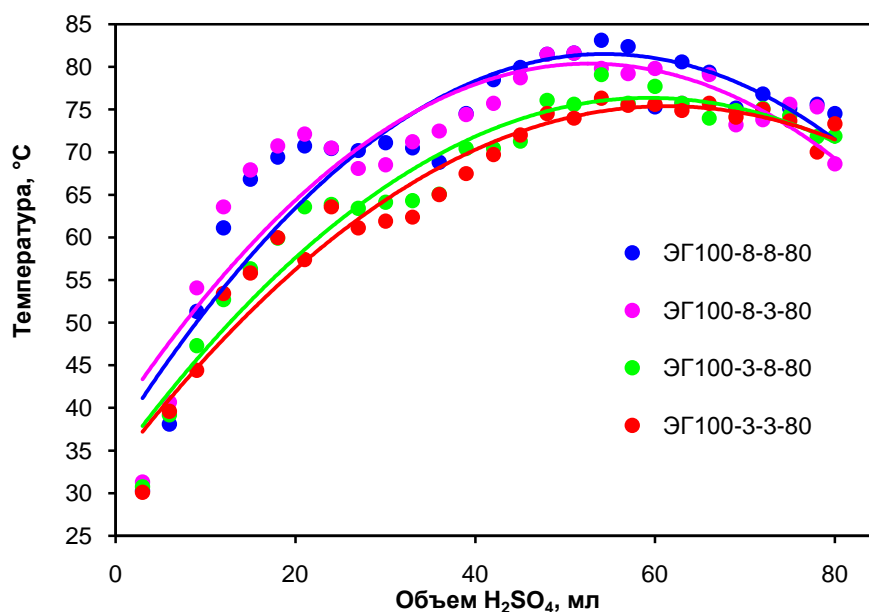


Рис. 3. Зависимость температуры от объема добавляемой серной кислоты (серия 2)

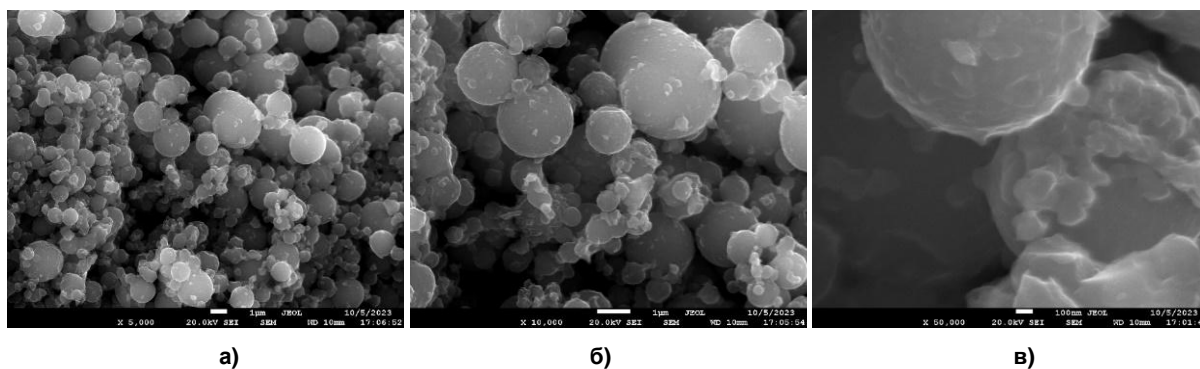


Рис. 4. Морфология образца ЭГ100-5-5-50 по данным электронной микроскопии: при увеличении $\times 5000$ (а), $\times 10000$ (б) и $\times 50000$ (в)

Таблица 3

Данные элементного анализа образцов, масс. %

Название образца	C	O	S	Cl	K	Fe	Cu	Сумма
B150-5ФС-0,1ОП-50НСl-10Н ₂ SO ₄	98,83	0,30	0,34	0,03	0,34	0,05	0,11	100,00
B150-5ФС-0,1ОП-100НСl	99,13	0,71	0,01	0,01	0,07	0,02	0,06	100,00
B150-5ФС-1ОП-50НСl	99,59	0,21	0,01	0,03	0,11	0,00	0,04	100,00
B150-5ФС-1ОП-100НСl	98,47	0,36	0,06	0,01	0,27	0,02	0,81	100,00
ЭГ100-20ФС-5ОП-50НСl-100С	99,64	0,27	0,01	0,00	0,05	0,00	0,02	100,00
ЭГ100-20ФС-2,5ОП-50НСl-100С	99,45	0,44	0,00	0,00	0,07	0,00	0,03	100,00
ЭГ100-5ФС-5ОП-50НСl	97,06	2,24	0,02	0,48	0,15	0,00	0,04	100,00
ЭГ100-5ФС-20ОП-100НСl	98,47	1,21	0,03	0,11	0,13	0,02	0,04	100,00
ЭГ100-5ФС-5ОП-50Н ₂ SO ₄	99,95	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,01	100,00
ЭГ100-5ФС-20ОП-50НСl	99,70	0,09	0,01	0,02	0,11	0,00	0,07	100,00
ЭГ100-10ФС-5ОП-50НСl+10Н ₂ SO ₄	96,24	1,73	0,03	0,24	0,69	0,47	0,60	100,00
ЭГ100-10ФС-2,5ОП-50НСl	98,44	1,47	0,00	0,01	0,04	0,01	0,04	100,00

По данным динамического рассеяния света удалось определить размеры частиц суспензии полимера (табл. 4, рис. 5). При этом в таблице приведены значения размера частиц и содержания для наиболее характерной фракции, а также средний размер частиц. Размер точек на графиках пропорционален размеру частиц. Из измерений можно заключить, что рост содержания ФС в целом приводит к увеличению размера капель эмульсии (и далее частиц суспензии), что следует избегать при получении наиболее мелких микросфер. К данным DLS следует относиться с осторожностью, поскольку, например, для образца ЭГ100-3-8-30 электронная микроскопия его не подтверждает. Хорошее совпадение размеров по DLS и электронной микроскопии следует отнести к более надежным данным. В других случаях следует предполагать, что завышенные значения размеров по DLS вызваны слипанием частиц в агломераты.

Определение дзета-потенциала частиц суспензии полимера позволяет определить интервал рН, при котором эта суспензия наименее устойчива, что удобно использовать для ее центрифугирования и очистки. При рН=1 дзета-потенциал частиц полимера составил около +50 мВ, а при рН=12 – около –30 мВ, что позволяет заключить, что изоэлектрическая точка суспензии находится около рН=4.

Таблица 4

Размер частиц суспензии по данным DLS и СЭМ

Название образца	Размер частиц фракции, нм	Содержание фракции, масс. %	Средний размер, нм	Средний размер по данным СЭМ, нм
ЭГ100-3ФС-3ОП-30Н ₂ O	573	50	496	500–600
	419	50		
ЭГ100-3ФС-8ОП-30Н ₂ O	9,13	100	9,13	500–1000
ЭГ100-8ФС-8ОП-80Н ₂ O	5410	35	1902	10000
	13,86	65		
ЭГ100-8ФС-8ОП-30Н ₂ O	1854	89	1700	900–1000
	462	11		
ЭГ100-8ФС-3ОП-30Н ₂ O	5600	35	3107	600–900
	1765	65		
ЭГ100-3ФС-3ОП-80 Н ₂ O	2736	11	351	10000
	56,9	89		
ЭГ100-3ФС-8ОП-80 Н ₂ O	5600	29	2214	400–600
	2680	17		
ЭГ100-8ФС-3ОП-80 Н ₂ O	249	54	2935	700–900
	5650	16		
ЭГ100-5ФС-5ОП-50 Н ₂ O	2419	84	1193	600–1000
	1970	58		
ЭГ100-5ФС-5ОП-50 Н ₂ O	561	9	1193	600–1000
	1,13	33		

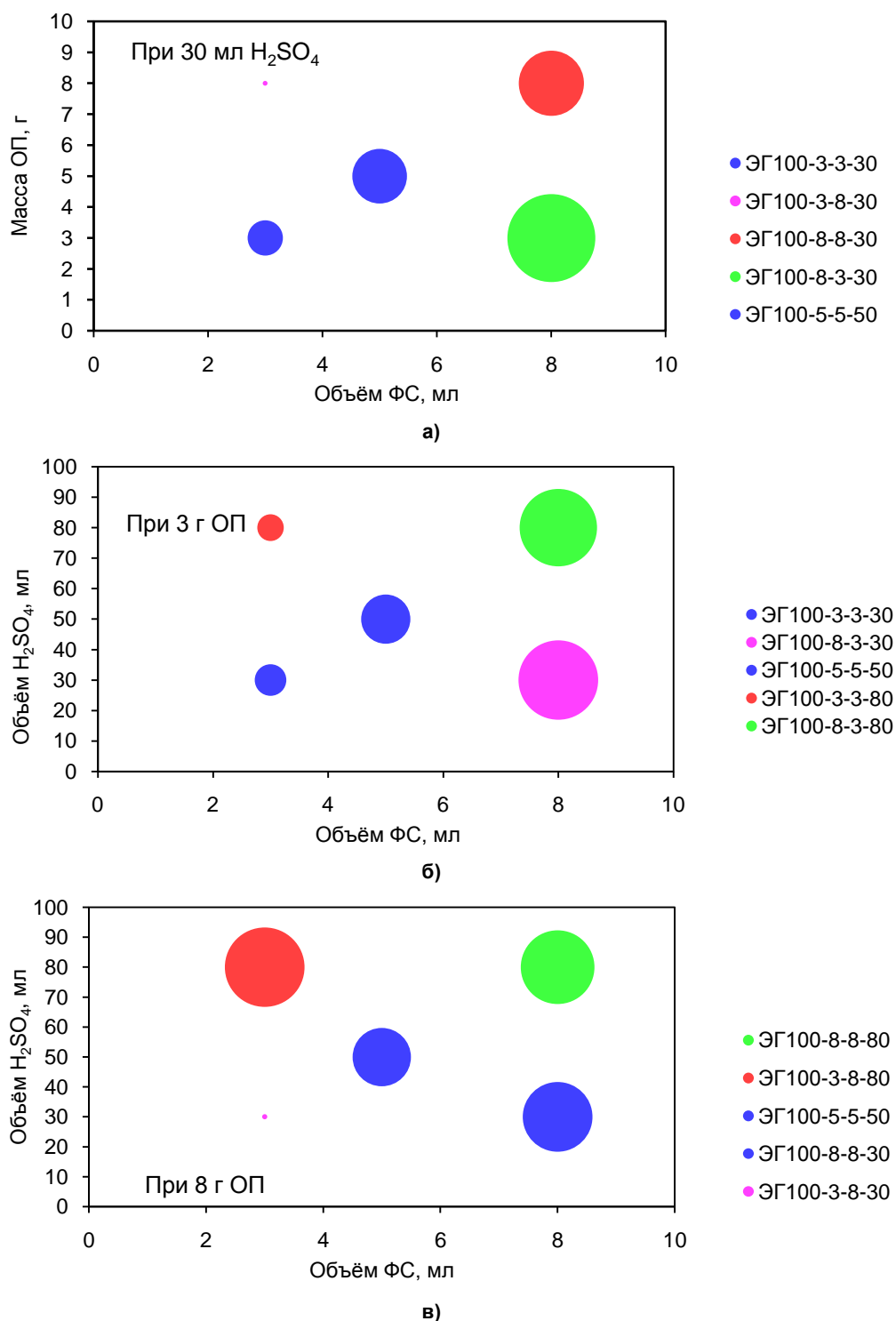


Рис. 5. Зависимость среднего размера частиц суспензии (серия 2) от объема ФС при переменных: а) 30 мл H₂SO₄, б) 3г ОП-10, в) 8 г ОП-10

Методом циклической вольтамперометрии были получены вольтамперограммы пастового электрода на основе ЭГ100-5-5-50 без добавок и с добавлением 5 % BaFe₁₂O₁₉ с соотношением твердый материал : масло = 80 : 10 для обоих электродов (рис. 6). Положения максимумов пиковых токов при введении гексаферрита бария существенно сближаются, что косвенно свидетельствует о высокой пригодности полученных микросфер для изготовления пастовых электродов с вводимыми частицами катализаторов. Удобно сравнить результаты тестирования электрода на

основе ЭГ100-5-5-50 без добавок с таким же электродом, приготовленным из молотого графита ВПГ-4, показавшего намного большее перенапряжение (см. рис. 6).

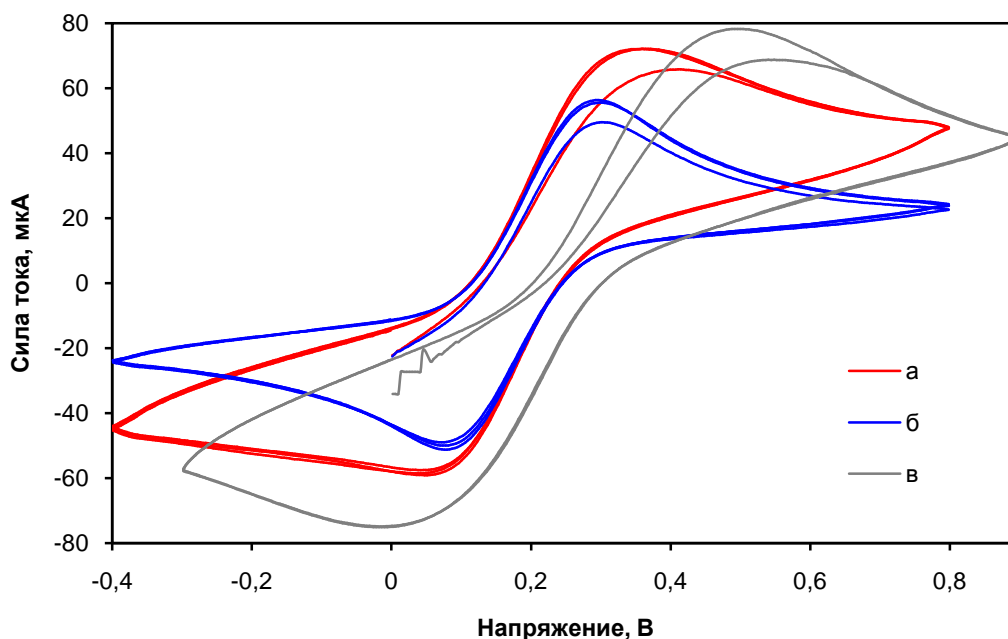


Рис. 6. Кривые ЦВА пастовых электродов (относительно ХСЭ):
на основе ЭГ100-5-5-50 без добавок (а), на основе ЭГ100-5-5-50 с добавлением 5% $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (б),
на электроде с молотым графитом (в)

Заключение

В работе был получен и исследован материал, состоящий из стеклоуглеродных микросфер. Выявлено, что рост содержания фурфуролового спирта приводит к росту размера частиц эмульсии. ОП-10 повышает устойчивость против слияния капель. Из всех изученных материалов по малому размеру и высокому выходу наиболее перспективным получился образец из раствора с содержанием 100 мл этиленгликоля, 5 мл фурфуролового спирта, 5 мл ОП-10, 50 мл серной кислоты. Электрохимическое тестирование показало пригодность микросфер для применения в пастовых электродах. Тем не менее, сравнение с литературными данными для аминофенольных смол дает основание полагать, что их следует рассматривать как объект для более пристального исследования, дающий без использования органических растворителей и без высокой концентрации кислот более мелкие сферы углерода с более высоким выходом.

Список источников

1. Antonio N.-M., Rub R.A.N.-M. // Journal of Materials Chemistry. 2010. V. 21, No. 6. P. 1664. DOI: 10.1039/C0JM01350A
2. Zhang P., Qiao Z. A., Dai S. // Chemical Communications. 2015. V. 51, No. 45. P. 9246. DOI: 10.1039/C5CC01759A
3. Díez N., Sevilla M., Fuertes A.B. // Materials Today Nano. 2021. V. 16. P. 100147. DOI: 10.1016/j.mtnano.2021.100147
4. Yang T., Liu J., Zhou R., Chen Z., Xu H. // Materials Chemistry A. 2014 V. 2. P. 18139 DOI: 10.1039/C4TA04301D
5. Yu Q., Guan D., Zhuang Z., Li J. // ChemPlusChem. 2017. V. 82. P. 1. DOI: 10.1002/cplu.201700182
6. Cho I.W., Son Seung Uk, Yang MinHo et al. // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2020. V. 876. P. 114739. DOI: 10.1016/j.jelechem.2020.114739
7. Wei N., Li X., Yin H. et al. // Journal of Materials Science. 2023. V. 58, No. 12. P. 5244. DOI: 10.1007/s10853-023-08347-0
8. Fan L., Xin Y., Xu Y. et al. // Microchemical Journal. 2021. V. 170. P. 106770. DOI: 10.1016/j.microc.2021.106770

9. Peer M., Qajar A., Rajagopalan et al. // Carbon. 2013. V. 51. P. 85. DOI: 10.1016/j.carbon.2012.08.015
10. Yao J., Wang H., Liu J. et al. // Carbon. 2005. V. 43, No. 8. P. 1709. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.02.014
11. Guaraldo T.T., Goulart L.A., Moraes F.C. et al. // Applied Surface Science. 2019. V. 470. P. 555. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.09.226
12. Zhang D., Qian J., Yi Y. et al. // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2019. V. 847. P. 113229. DOI: 10.1016/j.jelechem.2019.113229
13. Jayaraman S., Rajarathinam T., Chang S. C. // Chemosensors. 2023. V. 11, No. 4. P. 254. DOI: 10.3390/chemosensors11040254
14. Yi Y., Sun H., Zhu G. et al. // Analytical Methods. 2015. V. 7, No. 12. P. 4965. DOI: 10.1039/C5AY00654F
15. Zhao X., Zhang L., Chu Z. et al. // Molecules. 2023. V. 28, No. 7. P. 3006. DOI: 10.3390/molecules28073006
16. Gan T., Sun J., Yu M. et al. // Food chemistry. 2017. V. 214. P. 82. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.07.054
17. Wang M., Hu B., Yang C. et al. // Biosensors and Bioelectronics. 2018. V. 99. P. 176. DOI: 10.1016/j.bios.2017.07.059
18. Astruc J., Nagalakshmaiah M., Laroche G. et al. // Carbohydrate polymers. 2017. V. 178. P. 352. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.08.138
19. Li C., Li J., Wang Z. et al. // Inorganic Chemistry Frontiers. 2017. V. 4, No. 2. P. 309. DOI: 10.1039/C6QI00502K
20. Zubizarreta L., Arenillas A., Pis J. J. // Applied surface science. 2008. V. 254, No. 13. P. 3993. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.12.025
21. Liu J., Wang X., Gao J. et al. // Electrochimica Acta. 2016. V. 211. P. 183. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.05.217
22. Granja-Banguera C.P., Silgado-Cortázar D.G., Morales-Morales J.A. // Molecules. 2022. V. 27, No. 5. P. 1550. DOI: 10.3390/molecules27051550
23. Ziegler D., Marchisio A., Montanaro L. et al. // Solid State Ionics. 2018. V. 320. P. 24. DOI: 10.1016/j.ssi.2018.02.028
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. et al. // Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2001. V. 31, No. 4. P. 311. DOI: 10.1080/20014091076785

Матвеев Константин Витальевич – лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, студент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: konstmatv2003@gmail.ru

Бежин Владислав Константинович – лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, студент кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: pek589@gmail.com

Гейнц Наталья Сергеевна – научный сотрудник кафедры экологии и химической технологии, научный сотрудник лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: geintsns@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 6 марта 2024 г.
The article was submitted 6 March 2024.*