

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ДИСПЕРГИРОВАННОГО ГРАФИТА В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ДОБАВКИ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ДВОЙНОСЛОЙНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

И.В. Братков, М.Г. Донцов, Т.В. Ершова

Илья Викторович Братков (ORCID 0000-0002-2112-0824)*, Максим Геннадьевич Донцов (ORCID 0000-0001-6408-6542), Татьяна Вениаминовна Ершова (ORCID 0000-0002-5350-8209)

Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: bratkov37@bk.ru *, maxdon79@yandex.ru, tanya.ersh@yandex.ru

В работе проведены исследования емкостных свойств электродных материалов электрохимических двойнослойных суперконденсаторов, модифицированных введением различных добавок. Исследуемой добавкой являлись наночастицы многослойного графена, полученные электрохимическим диспергированием графита. Данный метод получения достаточно качественных наночастиц графена на настоящий момент рассматривается как дешевый и надежный, что обуславливается его простотой и безопасностью. Наночастицы графена с невысокой стоимостью могут быть использованы в качестве эффективной электродной добавки в различных типах устройств накопления и хранения электроэнергии. В качестве активного материала суперконденсатора использован активированный уголь Norit DLC 30 Super. Исследования проводились с применением 3,7 М Н₂SO₄ в качестве рабочего электролита в двухэлектродной ячейке типа Swagelock. Методами потенциодинамической развертки и гальваностатического заряда-разряда изучено влияние добавки электрохимически диспергированного графена (ЭДГ) на электрохимическую эффективность и удельную емкость электродного материала. Установлено, что введение в электродную массу 1,0 масс.% ЭДГ приводит к увеличению удельной емкости с 116,4 до 126,4 Ф/г по сравнению с электродным материалом, приготовленным с добавкой 5 масс.% ацетиленовой сажи. Электродный материал, модифицированный добавкой ЭДГ, демонстрирует также и большую обратимость электродных процессов. Потенциодинамические исследования в области скоростей развертки потенциала 10 – 200 мВ/с показали хорошую стабильность работы электродов при всех скоростях заряда-разряда. Наибольшее увеличение емкостных характеристик модифицированных электродов наблюдается в области низких скоростей заряда-разряда, что говорит об увеличении способности электродной поверхности к адсорбции и десорбции ионов электролита. Однако электродный материал с добавкой сажи демонстрирует несколько большую стабильность емкостных свойств в области высоких скоростей заряда-разряда.

Ключевые слова: электрохимический суперконденсатор, электрохимически диспергированный графит

INVESTIGATION OF ELECTROCHEMICAL EXFOLIATED GRAPHITE AS ELECTRICAL CONDUCTIVE ADDITIVE IN ELECTROCHEMICAL DOUBLE-LAYER CAPACITORS

I.V. Bratkov, M.G. Dontsov, T.V. Ershova

Il'ya V. Bratkov (ORCID 0000-0002-2112-0824)*, Maksim G. Dontsov (ORCID 0000-0001-6408-6542), Tat'yana V. Ershova (ORCID 0000-0002-5350-8209)

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: bratkov37@bk.ru *, maxdon79@yandex.ru, tanya.ersh@yandex.ru

In this work, studies of the capacitive properties of electrode materials of electrochemical double-layer supercapacitors modified by the introduction of various additives have been carried out. The investigated additive was multilayer graphene nanoparticles obtained by electrochemical dispersion of graphite. This method of obtaining graphene nanoparticles is currently considered as a cheap method for obtaining sufficiently high-quality graphene nanoparticles. That is due to its simplicity and safety. Low-cost graphene nanoparticles can be used as an effective electrode additive in various types of energy storage and storage devices. The active material of the supercapacitor is Norit DLC 30 Super activated carbon. The studies were carried out using 3.7 M H₂SO₄ as a working electrolyte in a two-electrode Swagelock cell. The influence of the addition of electrochemically dispersed graphene (EDG) on the electrochemical efficiency and specific capacity of the electrode material has been studied by the methods of potentiodynamic scanning and galvanostatic charge-discharge. It was found that the introduction of 1.0% EDG into the electrode mass leads to an increase in the specific capacity from 116.4 to 126.4 F/g in comparison with the electrode material prepared with the addition of 5% carbon black. The EDG-modified electrode material also demonstrates a high reversibility of electrode processes. Potentiodynamic studies in the area of potential sweep rates of 10 - 200 mV/s have shown good stability of the electrode operation at all charge-discharge rates. The greatest increase in the capacitive characteristics of the modified electrodes is observed in the region of low charge-discharge rates, which indicates an increase in the ability of the electrode surface to adsorb and desorb electrolyte ions. However, the electrode material with the addition of carbon black exhibits a slightly higher stability of the capacitive properties in the region of high charge-discharge rates.

Key words: electrochemical supercapacitor, electrochemically exfoliated graphite

Для цитирования:

Братков И.В., Донцов М.Г., Ершова Т.В. Исследование электрохимически диспергированного графита в качестве электропроводящей добавки в электрохимических двойнослойных конденсаторах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 83–88. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6870.

For citation:

Bratkov I.V., Dontsov M.G., Ershova T.V. Investigation of electrochemical exfoliated graphite as electrical conductive additive in electrochemical double-layer capacitors. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 83–88. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6870.

ВВЕДЕНИЕ

Электрохимический двойнослойный конденсатор (ЭДСК) – электрохимическое устройство накопления энергии, характеризующееся высокой эффективностью и большим жизненным циклом [1, 2]. Ввиду своих способностей к быстрому накоплению и отдаче электроэнергии, суперконденсаторы находят свое применение в электро-транспорте, системах рекуперации энергии, в качестве кратковременного источника тока и т.д. [3, 4].

Рассматривают возможность использования для изготовления электродов множество материалов, в частности углеродных – активированные угли [1-2, 5, 6], графен [7-12], нанотрубки [13, 14]. Наибольшее применение в качестве электродного материала на настоящий момент получили активированные угли (АУ), обладающие высокими значениями удельной поверхности и пористости, что обеспечивает высокие удельные характеристики суперконденсатора [15]. Основной недостаток АУ

– необходимость использования электропроводящих добавок в связи с их низкой электропроводностью. Как правило, в качестве таких добавок применяют различные сажи. К преимуществам таких добавок стоит отнести их невысокую стоимость, однако для обеспечения оптимальной работы устройства требуется введение в электродную массу большого количества сажи, что может привести к снижению удельной емкости электродного материала. В последнее время появляются работы, показывающие использование в качестве электропроводящих добавок углеродных наноматериалов. Углеродные нанотрубки и графен обладают высокой электропроводностью и удельной поверхностью, химической и электрохимической стабильностью, благодаря чему являются перспективными кандидатами как в самостоятельные электродные материалы, так и в электропроводящие добавки [4]. Их широкое применение ограничивает сложность получения и связанная с этим высокая стоимость, а также необходимость очистки от вспомогательных ПАВ, активно используемых при их получении.

В последнее время для получения многослойных графенов все больше используется дешевый и простой метод электрохимического диспергирования графита (ЭДГ) [16-19], который позволяет получать суспензии графена удовлетворительного качества даже без применения ПАВ. В данной работе предложено использование композиционного материала АУ/ЭДГ в качестве электродного материала электрохимического двойного конденсатора.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Наночастицы ЭДГ получали путем анодной обработки графитовых электродов в 1,0 М H_2SO_4 при потенциале 6,0 В. Полученный порошок тщательно промывали водой, затем абсолютированным раствором изопропилового спирта (ИПС_{абс}). Сушку проводили при 60 °С в течение 12 ч. Затем 400 мг порошка смешивали с 40 мл дистиллированной воды. Для повышения стабильности суспензии с помощью 25-% раствора NH_4OH задавали значение рН раствора равное 10. Далее проводили ультразвуковое диспергирование раствора и центробежную классификацию наночастиц [20, 21].

Осаждение наночастиц и частичное удаление поверхностных кислородсодержащих групп проводили методом химического восстановления, с использованием аскорбиновой кислоты в качестве восстановителя. Осадок промывали на центрифуге дистиллированной водой, а затем ИПС_{абс}. В результате получали гель, содержащий 1,0 масс. % наночастиц ЭДГ.

В качестве активного материала ЭДСК использовали активированный уголь Norit DLC 30, а в качестве рабочего электролита – 3,7М H_2SO_4 . Электродные материалы ЭДСК получали следующим образом. К навеске АУ добавляли связующее – суспензию фторопласта Ф-4Д в количестве 5 масс. % от общей массы электрода, затем добавку ацетиленовой сажи или геля ЭДГ в заданном количестве. К смеси добавляли ИПС_{абс} и гомогенизировали с помощью ультразвука. Затем удаляли ИПС до получения консистенции густой пасты. Из полученной пасты методом каландрирования изготавливали углеродную ленту толщиной 0,35 мм. Для изготовления электродов вырубали диски диаметром 13 мм, сушили их под вакуумом при 250 °С, затем пропитывали рабочим электролитом. Пропитку также осуществляли под вакуумом.

Электрохимические характеристики электродных материалов исследовали в ячейке двухэлектродной конфигурации (рис. 1).

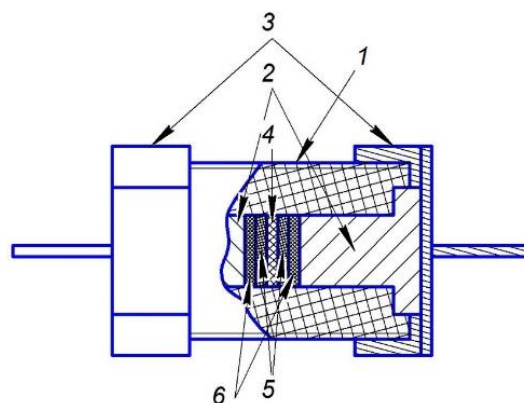


Рис. 1. Схема испытательной ячейки: 1) корпус из фторопласта; 2) поршни из нерж. стали; 3) прижимные гайки с токоотводом; 4) сепаратор из целлюлозы; 5) исследуемые электроды; 6) токосъемники из графитовой фольги

Fig. 1. Test cell layout: 1) PTFE housing; 2) stainless steel pistons; 3) clamping nuts with a down conductor; 4) Cellulose separator; 5) investigated electrodes; 6) graphite foil collectors

Исследования проводились с помощью потенциостата-гальваностата Elins P-30J. Электрохимические характеристики получены в потенциодинамическом режиме в области значений скорости развертки потенциала 10-200 мВ/с и гальваностатическом режиме заряда-разряда при плотности тока 1 А/г. Удельную емкость определяли по формуле [4, 22]:

$$C_{уд} = \frac{4 \cdot I}{\frac{\partial U}{\partial \tau} \cdot m} \quad (\text{Ф/г}),$$

где I – ток заряда или разряда, А; $\frac{\partial U}{\partial \tau}$ – скорость изменения потенциала, мВ/с; m – масса электродов (без связующего), г.

Внутреннее сопротивление (ESR) рассчитывали по скачку напряжения при скачке тока в начале заряда ДСК (после выдержки в течение 1 мин при напряжении 0 В в потенциостатическом режиме):

$$R_{ESR} = \frac{\Delta U}{I} \quad (\text{Ом}),$$

где I – ток заряда, ΔU – скачок напряжения.

Значение КПД определяли из соотношения емкости, сообщенной при заряде к разрядной емкости элемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее распространенным электродным материалом ЭДСК являются активированные угли, обеспечивающие высокие удельные характеристики. Однако ввиду их низкой электропроводности необходимо использование добавок, повышающих электропроводность электродного материала. Наиболее распространенной электропроводящей добавкой является углеродная сажа. Такой вариант

модификации электродов является дешевым, но при этом имеется значимый недостаток. Количество сажи, вводимой в электродный материал, может достигать 10-15% от общей массы электрода, что приводит к уменьшению доли активного материала и, как следствие, снижению удельной емкости электродного материала. В данной работе в качестве электропроводящей добавки использован многослойный графен, полученный методом электрохимического диспергирования.

Ниже (рис. 2) представлены циклические вольтамперные кривые для макета ЭДСК с электродами, модифицированными различными добавками.

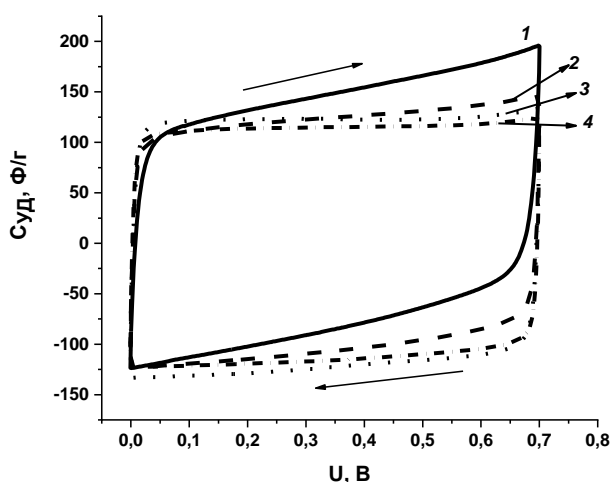


Рис. 2. Циклические вольтамперные кривые в 3,7 М H₂SO₄ для электродных материалов: 1) Norit DLC Super 30 без добавок; 2) + 1 масс% сажи; 3) + 1 масс% ЭДГ; 4) + 5 масс% сажи
Fig. 2. Cyclic CV curves for electrode materials in 3.7 M H₂SO₄: 1) Norit DLC Super 30 without additives; 2) + 1 wt% carbon black; 3) + 1 wt% EDG; 4) + 5 wt% carbon black

Видно, что введение добавок значительно улучшает вид кривых, уменьшая наклон вольтамперных кривых, что говорит об увеличении доли нефаарадеевских процессов накопления энергии. Electrodes, modified with 1 mass. % EDG and 5 mass. % carbon black, demonstrate the highest reversibility of electrode processes, and specifically the curves have the appearance of an almost ideal rectangle. In the sample, modified with EDG, the best electrochemical behavior is observed, characterized by a wider area of ideal polarizability and the largest area under the cyclic voltammogram.

Для оценки емкостных свойств электродных материалов мы снимали гальваностатические заряд-разрядные кривые при плотности тока заряда-разряда 1 А/г. На основании полученных данных рассчитывали удельную емкость материалов,

электрохимическую эффективность работы макета ЭДСК и его внутреннее эквивалентное сопротивление (рис. 3, таблица).

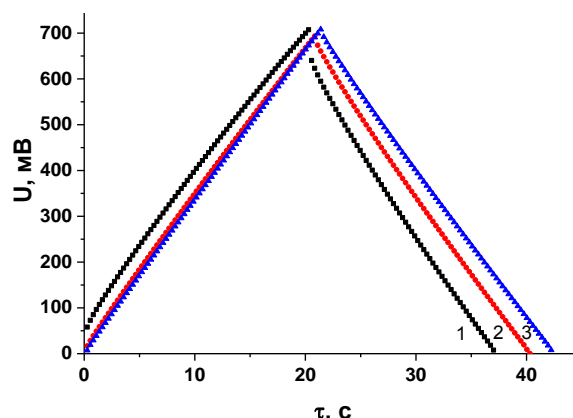


Рис. 3. Гальваностатические заряд-разрядные кривые макета суперконденсатора после 10 циклов при плотности тока 1 А/г, 3,7 М H₂SO₄. Материал электродов: 1) Norit DLC Super 30 без добавок; 2) + 1 масс% сажи; 3) + 1 масс% ЭДГ
Fig. 3. Galvanostatic charge-discharge curves of a prototype supercapacitor after 10 cycles at a current density of 1 A / g, 3.7 M H₂SO₄. Electrode material: 1) Norit DLC Super 30 without additives; 2) + 1 wt% carbon black; 3) + 1 wt% EDG

Таблица

Удельные электрохимические характеристики электродных материалов
Table. Specific electrochemical characteristics of electrode materials

№ п/п	Добавка	C _{уд} , Ф/г	КПД, %	R _{ESR} , Ом
1	Без добавок	106,0	84,7	6,8
2	1 масс. % сажи	112,4	94,8	2,2
3	5 масс. % сажи	116,4	99,9	2,0
4	0,5 масс. % ЭДГ	114,2	96,5	1,7
5	0,75 масс. % ЭДГ	121,9	100,0	1,6
6	1,0 масс. % ЭДГ	126,4	100,0	1,6

Введение добавок значительно увеличивает электрохимическую эффективность устройства, что можно связать со снижением эквивалентного сопротивления ячейки. Профиль заряд-разрядных кривых приобретает правильную форму треугольника. При использовании ЭДГ в качестве модифицирующей добавки отмечается существенный рост удельной емкости электродного материала. По всей вероятности, это обусловлено псевдоемкостью функциональных групп, присутствующих на поверхности наночастиц ЭДГ.

Для того, чтобы исследовать зависимость емкости электродного материала от скорости заряда-разряда нами были получены циклические вольтамперограммы при скорости развертки потенциала от 10 до 200 мВ/с в области рабочих напряжений от 0 до 0,7 В (рис. 4).

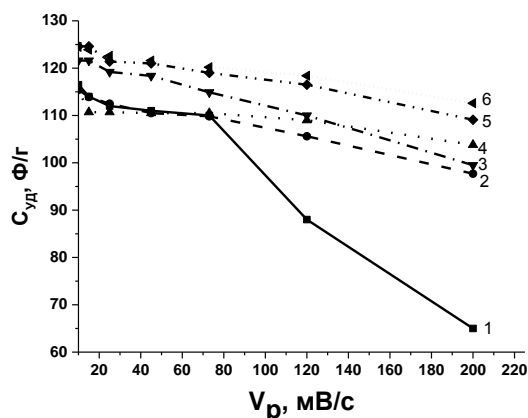


Рис. 4. Зависимость удельной емкости электродных материалов от скорости заряда-разряда. Электролит 3,7 М Н₂SO₄. Электродный материал: 1) Norit DLC Super 30 без добавок; 2) + 1 масс% сажи; 3) + 0,5 масс% ЭДГ; 4) + 5 масс% сажи; 5) + 0,75 масс% ЭДГ; 6) + 1,0 масс% ЭДГ

Fig. 4. Dependence of the specific capacity of electrode materials on the charge-discharge rate. Electrolyte 3.7 M H₂SO₄. Electrode material: 1) Norit DLC Super 30 without additives; 2) + 1 wt% carbon black; 3) + 0.5 wt% EDG; 4) + 5 wt% of carbon black; 5) + 0.75 wt% EDG; 6) + 1.0 wt% EDG

Из рис. 4 видно, что при увеличении до 5% содержания сажи в электродном материале при низких скоростях развертки потенциала начинает уменьшаться удельная емкость электродного материала. Однако в области высоких скоростей развертки удастся сохранять практически неизменную емкость, что говорит об увеличении способности электродного материала к переносу ионов электролита в объеме электрода. Использование ЭДГ в качестве добавки приводит к существенному росту удельной емкости, особенно в области низких скоростей заряда-разряда. Дегградация

удельной емкости с увеличением скорости развертки более выражена по сравнению с электродами с добавкой сажи. Можно сделать вывод, что введение гидрофильных частиц электрохимически диспергированного графена повышает способность поверхности к адсорбции и десорбции ионов электролита и в меньшей степени, по сравнению с сажей, к переносу ионов.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе проведена оценка возможности использования электрохимически диспергированного графена в качестве добавки в электродные материалы электрохимических двойно-слойных конденсаторов с водным электролитом. Показано, что ЭДГ проявляет большую эффективность по сравнению с сажей, приводит к росту электрохимической эффективности и удельной емкости электродного материала.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воропай А.Н., Суrowикин Ю.В., Лавренов А.В., Резанов И.В., Ильина М.Н. // *Международ. науч. журн. «Альтернатив. энергетика и экология»*. 2020. № 01-06. С. 84-92. DOI: 10.15518/isjaee.2020.01-06.84-92.
2. Тан Ё., Лну Я., Ю Ш., Гао Ф., Жао Ю. // *Электрохимия*. 2015. Т. 51. № 1. С. 89-98. DOI: 10.7868/S0424857014100120.
3. Horn M., MacLeod J., Liu M. // *Econom. Anal. and Policy*. 2019. V. 61. P. 93-103. DOI: 10.1016/j.eap.2018.08.003.
4. Yonggang Wang, Yanfang Song, Yongyao Xia. // *Chem. Soc. Rev.* 2016. V. 45. P. 5925-5950. DOI: 10.1039/c5cs00580a.
5. Атаманюк И.Н., Вервикишко Д.Е. // *Международ. науч. журн. «Альтернатив. энергетика и экология»*. 2013. № 11 (133). С. 92-98.
6. Вервикишко Д.Е., Янилкин И.В., Добеде Г.В., Вольпертс А., Атаманюк И.Н., Саметов А.А., Школьников Е.И. // *TBT*. 2015. Т. 53. Вып. 5. С. 799-806. DOI: 10.7868/S0040364415050270.

REFERENCES

1. Voropai A.N., Surovikin Yu.V., Lavrenov A.V., Rezanov I.V., Ilyina M.N. // *ISJAE*. 2020. N 01-06. P. 84-92 (in Russian). DOI: 10.15518/isjaee.2020.01-06.84-92.
2. Tang Y., Liu Y., Yu Sh., Gao F., Zhao Y. // *Elektrokhimiya*. 2015. V. 51. N 1. P. 89-98 (in Russian). DOI: 10.7868/S0424857014100120.
3. Horn M., MacLeod J., Liu M. // *Econom. Anal. Policy*. 2019. V. 61. P. 93-103. DOI: 10.1016/j.eap.2018.08.003.
4. Yonggang Wang, Yanfang Song, Yongyao Xia. // *Chem. Soc. Rev.* 2016. V. 45. P. 5925-5950. DOI: 10.1039/c5cs00580a.
5. Atamanyuk I.N., Vervikishko D.E. // *ISJAE*. 2013. N 11 (133). P. 92-98.
6. Vervikishko D.E., Yanilkin I.V., Dobelev G.V., Volperts A., Atamanyuk I.N., Sametov A.A., Shkolnikov E.I. // *Teplofiz. Vysokikh Temperatur*. 2015. V. 53. N 5. P. 799-806 (in Russian). DOI: 10.7868/S0040364415050270.
7. Zhe Weng, Yang Su, Da-Wei Wang, Feng Li, Jinhong Du, Hui-Ming Cheng. // *Adv. Energy Mater.* 2011. V. 1. N 5. P. 917-922. DOI: 10.1002/aenm.201100312.

7. **Zhe Weng, Yang Su, Da-Wei Wang, Feng Li, Jinhong Du, Hui-Ming Cheng.** // *Adv. Energy Mater.* 2011. V. 1. N 5. P. 917–922. DOI: 10.1002/aenm.201100312.
8. **Ervin M.H.** // *Electrochim. Acta.* 2014. V. 147. P. 610–616. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.10.006.
9. **Ke Q, Wang J.** // *J. Materiomics.* 2016. V. 2. N 1. P. 37-54. DOI: 10.1016/j.jmat.2016.01.001.
10. **Randhir Singh C.C.** // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2016. V. 11. P. 6336 – 6346. DOI: 10.20964/2016.07.18.
11. **Yi-Zhou Zhang.** // *Chem. Soc. Rev.* 2015. V. 44. P. 5181—5199. DOI: 10.1039/c5cs00174a.
12. **Dongxu He.** // *J. Electrochem. Soc.* 2018. V. 165. N 14. A3481. DOI: 10.1149/2.1041814jes.
13. **Fekri Aval L., Ghoranneviss M., Behzadi G.** // *Heliyon.* 2018. V. 4. N 11. e00862. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00862.
14. **Lu Zan, Raad Raad, Safaei Farzad, Xi Jiangtao, Liu Zhoufeng, Foroughi Javad.** // *Front. Mater.* 2019. V. 6. 138. DOI: 10.3389/fmats.2019.00138.
15. **Elzbieta Frackowiak.** // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2007. V. 9. P. 1774-85. DOI: 10.1039/b618139m.
16. **Parvez K.** // *ACS Nano.* 2013. V. 7. P. 3598-3606. DOI: 10.1021/nn400576v.
17. **Amin Taheri Najafabadi, Elöd Gyenge.** // *Carbon.* V. 71. P. 58-69. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.01.012.
18. **Liu J.** // *NanoEnergy.* 2013. V. 2. P. 377-386. DOI: 10.1016/nn201211003.
19. **Яковлева Е.В., Яковлев А.В., Мостовой А.С., Целуйкин В.Н., Фролов И.Н.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 59-65. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6324.
20. **Братков И.В., Юдина Т.Ф., Мельников А.Г., Братков А.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 96-102. DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.5884.
21. **Братков И.В., Юдина Т.Ф., Мельников А.Г., Братков А.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 8. С. 90-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6221.
22. **Stoller D.M.** // *Energy Environ. Sci.* 2010. V. 3. P. 1294 - 1301. DOI: 10.1039/C0EE00074D.
8. **Ervin M.H.** // *Electrochim. Acta.* 2014. V. 147. P. 610–616. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.10.006.
9. **Ke Q, Wang J.** // *J. Materiomics.* 2016. V. 2. N 1. P. 37-54. DOI: 10.1016/j.jmat.2016.01.001.
10. **Randhir Singh C.C.** // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2016. V. 11. P. 6336 – 6346. DOI: 10.20964/2016.07.18.
11. **Yi-Zhou Zhang.** // *Chem. Soc. Rev.* 2015. V. 44. P. 5181—5199. DOI: 10.1039/c5cs00174a.
12. **Dongxu He.** // *J. Electrochem. Soc.* 2018. V. 165. N 14. A3481. DOI: 10.1149/2.1041814jes.
13. **Fekri Aval L., Ghoranneviss M., Behzadi G.** // *Heliyon.* 2018. V. 4. N 11. e00862. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00862.
14. **Lu Zan, Raad Raad, Safaei Farzad, Xi Jiangtao, Liu Zhoufeng, Foroughi Javad.** // *Front. Mater.* 2019. V. 6. 138. DOI: 10.3389/fmats.2019.00138.
15. **Elzbieta Frackowiak.** // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2007. V. 9. P. 1774-85. DOI: 10.1039/b618139m.
16. **Parvez K.** // *ACS Nano.* 2013. V. 7. P. 3598-3606. DOI: 10.1021/nn400576v.
17. **Amin Taheri Najafabadi, Elöd Gyenge.** // *Carbon.* V. 71. P. 58-69. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.01.012.
18. **Liu J.** // *NanoEnergy.* 2013. V. 2. P. 377-386. DOI: 10.1016/nn201211003.
19. **Yakovleva E.V., Yakovlev A.V., Mostovoy A.S., Tseluikin V.N., Frolov I.N.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 3. P. 59-65 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6324.
20. **Bratkov I.V., Yudina T.F., Melnikov A.G., Bratkov A.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2018. V. 61. N 11. P. 96-102. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.5884.
21. **Bratkov I.V., Yudina T.F., Melnikov A.G., Bratkov A.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2020. V. 63. N 8. P. 90-95. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6221.
22. **Stoller D.M.** // *Energy Environ. Sci.* 2010. V. 3. P. 1294 - 1301. DOI: 10.1039/C0EE00074D.

Поступила в редакцию 14.04.2023

Принята к опубликованию 26.04.2023

Received 14.04.2023

Accepted 26.04.2023