

DOI: 10.18721/JEST.26410

УДК 621.355.9 547.311 546.722/3

*И.А. Тюрикова, А.И. Демидов,
П.А. Новиков, К.С. Тюриков*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНОГО ОКСИДА ЖЕЛЕЗА В КАЧЕСТВЕ ДОБАВКИ К АНОДУ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

Рассмотрено применение наноразмерного магнетита в качестве добавки к углеродной матрице анода литий-ионного аккумулятора. Показано, что применение в составе анодного материала Carbon Black наноразмерного оксида железа Fe_3O_4 10–15 нм в качестве добавки позволяет повысить емкость почти в 3 раза с примерно $250 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ до $780 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$. На основании полученных результатов предложена схема последовательности процессов интеркаляции – деинтеркаляции ионов лития в углеродный каркас, содержащий молекулы оксида железа. Полученные результаты, подтвержденные расчетами и экспериментальными исследованиями, носят фундаментальный характер для понимания природы процессов, влияющих на повышение эксплуатационных характеристик аккумуляторов, а также прикладной характер для получения перспективных материалов анодов литий-ионных аккумуляторов с повышенной электрической емкостью.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, оксиды железа, наночастицы Fe_3O_4 , аноды, емкость батареи.

Ссылка при цитировании:

Тюрикова И.А., Демидов А.И., Новиков П.А., Тюриков К.С. Применение наноразмерного оксида железа в качестве добавки к аноду литий-ионного аккумулятора // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 4. С. 123–131. DOI: 10.18721/JEST.26410

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*I.A. Tyurikova, A.I. Demidov,
P.A. Novikov, K.S. Tyurikov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

NANOSIZED IRON OXIDE APPLICATION AS AN ADDITIVE TO A LITHIUM-ION BATTERY ANODE

The paper considers application of nanosized magnetite as an additive to the carbon matrix of a lithium-ion battery anode. We show that the use of 10–15 nm nanosized iron oxide Fe_3O_4 as an additive in the composition of the anode material Carbon Black makes it possible to increase the capacity by almost 3 times: from approximately $250 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ to $780 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$. Based on the results obtained, we propose a diagram of the sequence of intercalation–deintercalation processes of lithium ions into a carbon framework containing iron oxide molecules. The results obtained, confirmed by calculations and experimental studies, are fundamental for understanding the nature of the processes that affect the increase in the performance of batteries, as well as their applied nature for obtaining promising anode materials for lithium-ion batteries with increased electrical capacity.

Keywords: lithium-ion battery, iron oxides, Fe_3O_4 nanoparticles, anodes, battery capacity.

Citation:

I.A. Tyurikova, A.I. Demidov, P.A. Novikov, K.S. Tyurikov, Nanosized iron oxide application as an additive to a lithium-ion battery anode, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 123–131, DOI: 10.18721/JEST.26410

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. В последние годы повышенный интерес исследователей привлекают направления возможного повышения емкости литий-ионных аккумуляторов для эффективного применения их в портативных электронных устройствах. Электроды с более высокой емкостью заряда могут существенно улучшить эксплуатационные характеристики литий-ионных батарей, сделать их компактнее и дешевле, однако это возможно только при условии, что сам материал не слишком дорогой или редкий.

Графит, как наиболее часто используемый материал для анодов литий-ионных аккумуляторов, позволяет обеспечить стабильную работу анода, но его применение существенно ограничено из-за низкой теоретической емкости ($372 \text{ мА}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$) [1]. На сегодняшний день, традиционные анодные материалы на углеродной основе полностью изучены и требуют развития нового подхода при разработке анодных систем, в связи с чем перед современными исследователями стоит задача поиска и создания более совершенных электродных материалов для литий-ионных аккумуляторов. Многообещающим подходом к получению высокоэффективных электродных материалов является их модифицирование различными добавками. В последнее время оксиды переходных металлов получили огромный исследовательский интерес в качестве перспективных анодных материалов для литий-ионных батарей из-за их высокой емкости [2]. Среди них магнетит (Fe_3O_4) особенно привлекателен по причине как высокой емкости, так и экологичности, распространенности, дешевизны и высокой электронной проводимости [3]. В [4] описано применение Fe_3O_4 в количествах, соизмеримых с углеродом, другими авторами рассматриваются незначительные добавки оксида железа [5]. Авторы [6, 7] считают важным и основополагающим моментом при изготовлении анодов литий-ионных аккумуляторов нового поколения с применением оксида железа использование наноразмерных частиц с высокой площадью поверхности.

Понимание процессов, влияющих на повышение емкости аккумуляторов за счет использования примесей способно влиять как на успешный результат поиска и создания новых композиций материалов анодов литий-ионных батарей, так и на улучшение их эксплуатационных характеристик в целом.

В связи с этим целью настоящей работы являлось решение прикладной задачи, заключающейся в получении перспективного анодного материала на основе углеродной матрицы Carbon Black с добавками оксида железа и установлении общих закономерностей процессов, определяющих повышение емкости аккумуляторов, изготовленных с применением композиционного материала на основе оксида железа и углерода.

Экспериментальная часть

Приготовление материала с наночастицами оксида железа, распределенными в углеродной матрице, проводили в несколько этапов. Магнитные наночастицы получали в соответствии со способом, описанным в [8], парциальным окислением ионов двухвалентного железа в водном растворе двойной серноокислой соли железа и аммония $\text{FeSO}_4\cdot(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (соль Мора) с последующим осаждением высокодисперсных частиц магнетита водным раствором аммиака, многократным промыванием и последующим отделением магнитных наночастиц от воды и сушкой при температуре 160°C . Далее полученный материал был смешан с углеродом Carbon Black (Tinci,

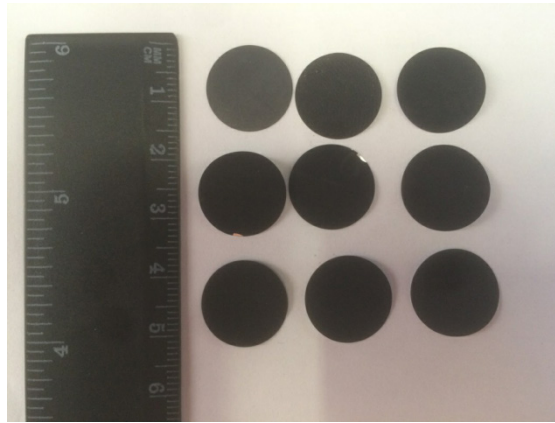


Рис. 1. Заготовки для анодов литий-ионных аккумуляторов
 Fig. 1. Blanks for anodes of lithium-ion batteries

КНР) в соотношении 1:9 по массе при добавлении 10% раствора поливинилиденфторида (PVDF, Tinci, КНР) в N-метилпирролидоне в соотношении 9:1 по массе. В результате монодисперсные наночастицы оксида железа равномерно распределялись в углеродной матрице. Полученную клеевидную суспензию (анодную массу) наносили на медную подложку, после чего проводили сушку и прокатку на вальцах. Для полного испарения растворителя из матрицы образцы помещали в сушильный шкаф и проводили термообработку при температуре 80 °С в течение 12 часов, после чего вырезали заготовки по форме электрода для литий-ионных батарей диаметром 15 мм (рис. 1). Сборку осуществляли в атмосфере сухого аргона. Электрохимические исследования проводили в герметичной двухэлектродной ячейке дисковой конструкции габарита CR2032. В качестве электрода сравнения двухэлектродной ячейки использовали металлический литий. Испытания проводили на зарядно-разрядном стенде СТ3008W-5V10mA (Neware) в гальваностатическом режиме при токе 0,16 мА и изменении напряжения от 0,05 до 3 В при комнатной температуре. Плотность тока составляла 0,09 мА·с⁻². Изучение морфологии образцов произведено с использованием растровой электронной микроскопии (Supra 55VP). Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществлен с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 изображены фотографии наночастиц Fe₃O₄, порошка Carbon Black и исследуемого материала, приготовленного на их основе, выполненные с помощью РЭМ. Примерный размер частиц углеродной матрицы составляет 20 нм, наночастиц оксида железа – находится в интер-

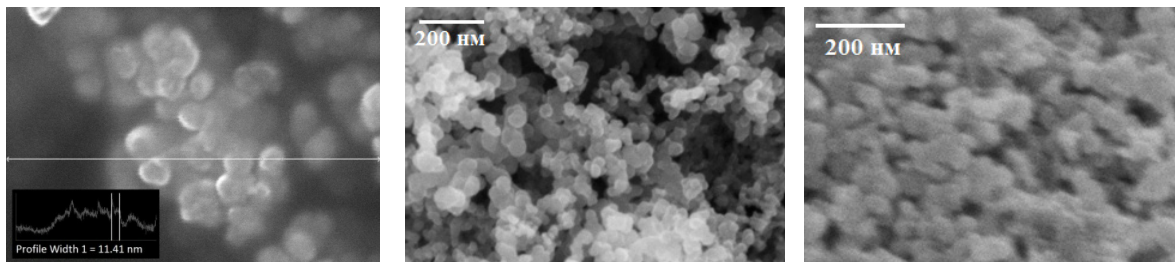


Рис. 2. РЭМ-изображения наночастиц оксида железа, Carbon Black и материала на их основе (слева-направо)
 Fig. 2. SEM images of iron oxide nanoparticles, Carbon Black and material based on them (from left to right)

вале 10-15 нм. Испытуемый материал представляет собой смесь сферических наночастиц оксида железа одного размерного порядка с углеродной основой.

На рис. 3 представлены дифрактограммы наноразмерного оксида железа до и после температурной обработки с постепенным повышением температуры от комнатной до 160 °С. Данный температурный режим выбран с целью выведения паров воды из пор, формируемых сферическими частицами [9]. В результате термообработки на поверхности наночастиц Fe_3O_4 образуется слой, отвечающий составу Fe_2O_3 .

В процессе циклирования испытуемых электродов время разряда на протяжении первых циклов постепенно снижается (рис. 4). Как видно по рис. 5, после существенного уменьшения удельной емкости в течение первых циклов (примерно на 30-35% от второго к пятому и последующим циклам), наблюдается выравнивание данного параметра до почти постоянного значения. Предположительно, такой характер представленных зависимостей связан с последовательностью процессов интеркаляции и деинтеркаляции примесного компонента и лития в углеродную матрицу.

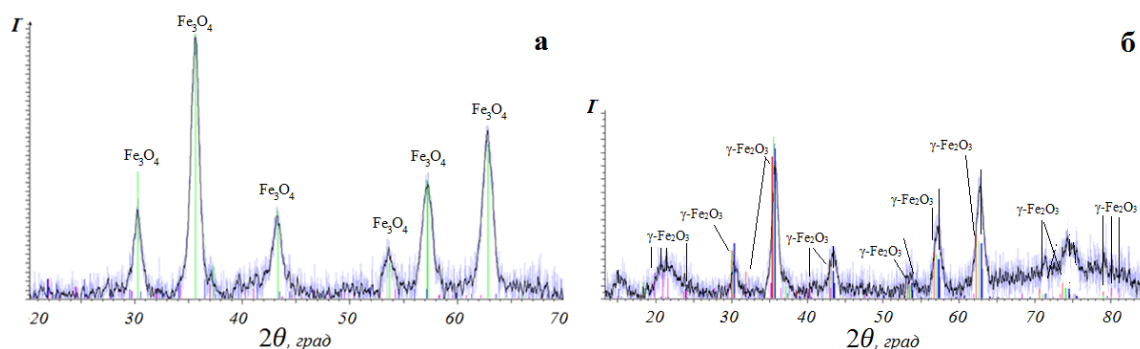


Рис. 3. Дифрактограмма наночастиц оксида железа до (а) и после (б) термообработки
Fig. 3. The XRD pattern of the iron oxide nanoparticles before (a) and after (b) heat treatment

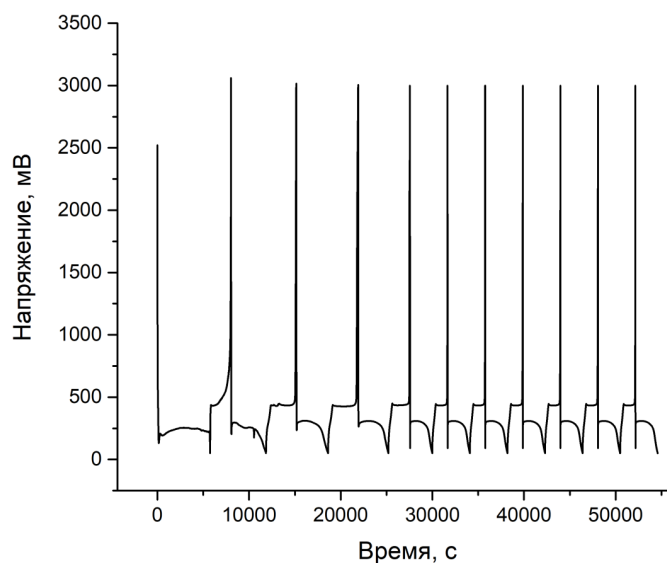


Рис. 4. Зависимость напряжения от времени для первых 10 циклов
Fig. 4. Time – voltage dependence for the first 10 cycles

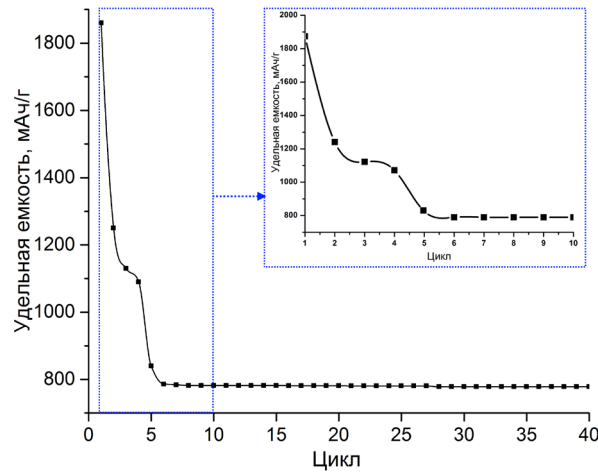
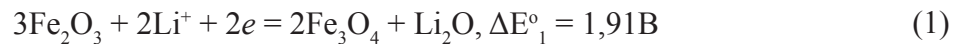


Рис. 5. Зависимость удельной емкости от порядкового номера цикла

Fig. 5. The serial number of the cycle – specific capacity dependence

Процесс заряда отрицательного электрода с участием оксидов железа может быть представлен как двухстадийный:



Во время первого цикла заряда возможно присутствие в углеродной матрице как частиц Fe, так и Fe₃O₄, которые в процессе следующих циклов могут участвовать в образовании частиц Fe. Значения стандартной величины ЭДС реакций (1) и (2) были рассчитаны по величинам стандартной энергии Гиббса^{1,2} соответствующих реакций.

При первом заряде происходит формирование отрицательного электрода – ионы лития внедряются (интеркалируют) в углеродную матрицу. Поскольку основой исследуемого материала является аморфный Carbon Black, то процесс заряда может быть записан в следующем виде:



Предельный состав интеркалята Li_xC_y определяется особенностями углеродного материала: каждый внедренный атом лития занимает место внутри углеродного каркаса. Различной степени интеркаляции x отвечает несколько соединений: LiC₆, LiC₁₂, LiC₁₈ и др. Соединение LiC₆ обладает отрицательным электродным потенциалом, который на 0,2 В положительнее потенциала металлического лития в том же электролите [10, 11].

При использовании Fe₂O₃, как и в случае с Fe₃O₄, в результате конверсионной реакции (2) образуются диспергированные в матрице из оксида лития частицы железа, при этом, исходя из значений ЭДС, сначала идут реакции (1) и (2) и только затем (3). В результате протекания конверсионных реакций (1) и (2) и реакции внедрения возможно образование сложных систем в объеме анода, содержащих углеродный каркас, внутри которого распределены атомы железа и лития

¹ Термодинамические константы веществ. Справочник в 10 вып. Вып. 10. Ч.1. Под ред. В. П. Глушко (отв. ред.). – М.: ВИНТИ, 1981. – 297 с.

² Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 8-е, перераб./ Под ред. А.А. Равделя и А. М. Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.

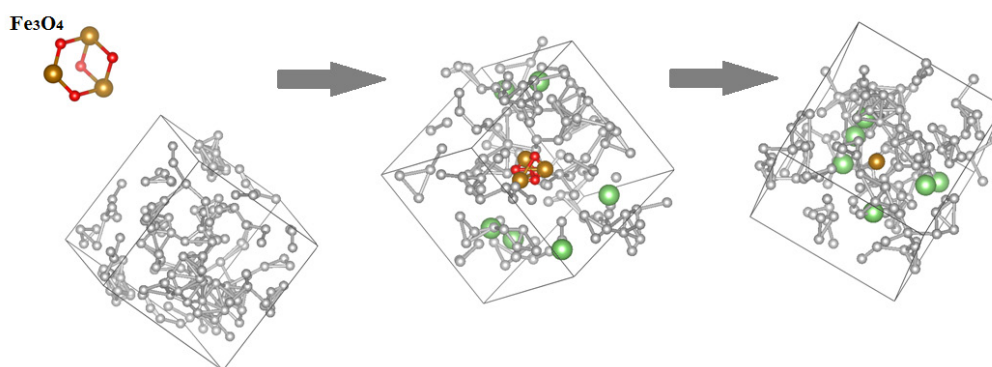


Рис. 6. Схема внедрения лития в углеродную матрицу, содержащую оксид железа
 Fig. 6. Scheme of lithium intercalation into a carbon matrix containing iron oxide

(рис. 6). Таким образом, в результате первых зарядно-разрядных циклов происходит восстановление оксида железа до железа в матрице оксида лития с последующей интеркаляцией лития вглубь каркаса. При этом находящийся в углеродном каркасе оксид железа "раздвигает" углерод в своем окружении, и в следующих циклах ионы лития активно проникают в это пространство и взаимодействуют с оксидом железа в соответствии с уравнениями (1) и (2).

Электрохимическая интеркаляция лития в углеродную матрицу включает в себя множество процессов, таких как диффузия ионов лития в растворе электролита, разряд ионов лития с одновременным взаимодействием с материалом электрода (углеродом) и диффузия внутри углеродного электрода [10, 11]. Поскольку подвижность электронов намного выше, чем у ионов лития, миграция вторых посредством электрического поля внутри углерода незначительна, и они в течение нескольких циклов, занимая положения с наиболее благоприятным окружением, то есть в максимальной по размерам межатомной пустоте, остаются в ней, продолжая дальнейшее циклирование из этих позиций (рис. 6). Таким образом, массовый перенос ионов лития в углероде можно рассматривать как диффузионный процесс. Поскольку диффузия в твердом состоянии обычно является медленным процессом, скорость диффузии будет лимитировать общую скорости реакции и первые несколько циклов заряда-разряда будут описывать интеркаляцию лития в пустоты [12], характеризуясь нестабильным временем цикла и емкостными параметрами процесса. Далее процесс разряда и заряда становится практически постоянным по времени и емкость элемента несущественно меняется в течение времени его работы.

Отметим, что данная схема справедлива в том случае, если оксид железа выступает в качестве добавки в общем объеме углеродного анодного материала, поскольку пустоты, создаваемые изначально оксидом железа, не переполняют общий объем материала, обеспечивая ограниченные более частым расположением углеродных атомов свободные объемы, куда диффундирует литий. При существовании избыточных пустот литий будет значительно более свободно перемещаться по углеродной матрице и менее активно и непредсказуемо (что может проявляться в нестабильном времени процесса заряда-разряда) взаимодействовать с рядом расположенным оксидом железа. Предположительно, именно такой характер интеркаляции влияет на повышение емкости электрода, а решение прикладной задачи по подбору оптимального соотношения углерод-оксид железа позволит добиться максимально возможной удельной емкости для такого материала анодов литий-ионных аккумуляторов. Важно, что емкость электродов будет также зависеть от особенностей частиц оксида железа, используемых в качестве добавки, в частности их размерных характеристик [7, 13], во многом определяемых процессом синтеза.

Для разных типов Carbon Black с разной площадью поверхности, используемых в качестве анодного материала, характерны различные значения удельной емкости, повышающейся с увеличением площади поверхности от $200 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ при $60 \text{ м}^2\cdot\text{г}^{-1}$ до примерно $600 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ для более высокопористых [14, 15]. С применением в составе анодного материала наноразмерного оксида железа становится возможным повышение емкости до $780 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$, в то время как удельная емкость наиболее доступного и применяемого в качестве углеродной матрицы Carbon Black составляет примерно $250 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$.

Заключение

Изучение процесса электрохимической интеркаляции-деинтеркаляции лития в углеродной матрице, содержащей оксид железа, позволяет сделать вывод о перспективности применения наночастиц магнетита в качестве добавок к анодам литий-ионных аккумуляторов с целью повышения их емкости более, чем в 3 раза. В соответствии с предложенной гипотезой внедрения атомов лития дано объяснение предпочтительности применения оксида железа в качестве добавки, то есть в небольших количествах относительно углерода. Наряду с этим, емкость электродов во многом определяется размерными характеристиками частиц добавки, а значит, методикой синтеза, обеспечивающей получение монодисперсных наночастиц оксида железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Choi S.** Lithium Intercalated Graphite with Preformed Passivation Layer as Superior Anode for Lithium Ion Batteries / S. Choi et al. // *Applied Surface Science*. – 2018. – V. 455. – P. 637–372.
- [2] **Lu Y.** Nanostructured Conversion-type Anode Materials for Advanced Lithium-Ion Batteries / Y. Lu et al. // *Chem*. – 2018. – V. 4. – № 5. – P. 972–996.
- [3] **Huang Y.** Ternary $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeCO}_3$ Composite as a High-Performance Anode Material for Lithium-Ion Batteries / Y. Huang et al. // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2019. – V. 123. – № 20. – P. 12614–12622.
- [4] **Wang Y.** One-Pot Magnetic Field Induced Formation of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ Composite Microrods with Enhanced Lithium Storage Capability / Y. Wang et al. // *Small*. – 2014. – V. 10. – № 14. – P. 2815–2819.
- [5] **Hao S.** Hierarchical three-dimensional Fe_3O_4 @porous carbon matrix/graphene anodes for high performance lithium ion batteries / S. Hao et al. // *Electrochimica Acta*. – 2018. – V. 260. – P. 965–973.
- [6] **Li Y.** Porous $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ @Carbon octahedron arrayed on three-dimensional graphene foam for lithium-ion battery / Y. Li et al. // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – V. 171. – P. 130–137.
- [7] **Yi Q.** Hollow Fe_3O_4 /carbon with surface mesopores derived from MOFs for enhanced lithium storage performance / Q. Yi et al. // *Science Bulletin*. – 2020. – V. 65. – № 3. – P. 233–242.
- [8] Пат. 2593392 Российская Федерация, МПК H01F1/28, B82B3/00. Способ получения ферромагнитной жидкости / А.И. Демидов, И.А. Полатайко; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО "СПбПУ Петра Великого". – 2015121189/07; заявл. 03.06.2015; опубл. 10.08.2016.
- [9] **Тюрикова И.А.** Влияние температуры на свойства системы Fe_3O_4 -маннит-вода / И.А. Тюрикова, А.И. Демидов // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2018. – Т. 24. – № 3. – С. 193–201.
- [10] **Морачевский А.Г.** Термодинамика сплавов лития с элементами подгруппы углерода (C, Si, Ge, Sn, Pb) / А.Г. Морачевский, А.И. Демидов; под. ред. А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2016. – 151 с.
- [11] **Ji K.** Lithium intercalation into bilayer graphene / K. Ji et al. // *Nature Communications*. – 2019. – V. 10. – Article № 275.

[12] **Mao C.** Selecting the Best Graphite for Long-Life, High-Energy Li-Ion Batteries / C. Mao et al. // Journal of The Electrochemical Society. – V. 165. – № 9. – A1837.

[13] **Yan Z.** Pulverization Control by Confining Fe₃O₄ Nanoparticles Individually into Macropores of Hollow Carbon Spheres for High-Performance Li-ion Batteries / Z. Yan et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – V. 10. – №3. – P. 2581–2590.

[14] **Patel M.U.M.** Comparative Study of Polysulfide Encapsulation in the Different Carbons Performed by Analytical Tools / M.U.M. Patel, R. Dominko // Ceramic Materials for Energy Applications V: A Collection of Papers Presented at the 39th International Conference on Advanced Ceramics and Composites. – 2015. – V. 36. – № 7. – P. 85–100.

[15] **Dong P.** Chemically treated carbon black waste and its potential applications / P. Dong et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2018. – V. 321. – P. 62–72.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТЮРИКОВА Ирина Андреевна – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: polatayko_irina@spbstu.ru

ДЕМИДОВ Александр Иванович – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р хим. наук.

E-mail: demidov1902@gmail.com

НОВИКОВ Павел Александрович – научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: novikov.p.a@gmail.com

ТЮРИКОВ Кирилл Сергеевич – заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: kirill.tyurikov@spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 15.10.2020

REFERENCES

[1] **S. Choi**, Lithium Intercalated Graphite with Preformed Passivation Layer as Superior Anode for Lithium Ion Batteries / S. Choi et al. // Applied Surface Science. – 2018. – V. 455. – P. 637–372.

[2] **Y. Lu**, Nanostructured Conversion-type Anode Materials for Advanced Lithium-Ion Batteries / Y. Lu et al. // Chem. – 2018. – V. 4. – № 5. – P. 972–996.

[3] **Y. Huang**, Ternary Fe₂O₃/Fe₃O₄/FeCO₃ Composite as a High-Performance Anode Material for Lithium-Ion Batteries / Y. Huang et al. // The Journal of Physical Chemistry C. – 2019. – V. 123. – № 20. – P. 12614–12622.

[4] **Y. Wang**, One-Pot Magnetic Field Induced Formation of Fe₃O₄/C Composite Microrods with Enhanced Lithium Storage Capability / Y. Wang et al. // Small. – 2014. – V. 10. – № 14. – R. 2815–2819.

[5] **S. Hao**, Hierarchical three-dimensional Fe₃O₄@porous carbon matrix/graphene anodes for high performance lithium ion batteries / S. Hao et al. // Electrochimica Acta. – 2018. – V. 260. – P. 965–973.

[6] **Y. Li**, Porous Fe₂O₃/Fe₃O₄@Carbon octahedron arrayed on three-dimensional graphene foam for lithium-ion battery / Y. Li et al. // Composites Part B: Engineering. – 2019. – V. 171. – P. 130–137.

[7] **Q. Yi**, Hollow Fe₃O₄/carbon with surface mesopores derived from MOFs for enhanced lithium storage performance / Q. Yi et al. // Science Bulletin. – 2020. – V. 65. – № 3. – P. 233–242.

- [8] Pat. 2593392 RU, IPC H01F1/28, B82B3/00. Method for obtaining ferromagnetic liquid / A. I. Demidov, I. A. Polatayko; applicant and patentee FSAEI HE "Peter the Great SPbPU". – 2015121189/07; decl. 03.06.2015; publ. 10.08.2016.
- [9] **I.A. Tyurikova**, Vliyaniye temperatury na svoystva sistemy Fe₃O₄-mannit-voda / I.A. Tyurikova, A.I. Demidov // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. – 2018. – T. 24. – № 3. – S. 193–201.
- [10] **A.G. Moraczewski**, Thermodynamics of lithium alloys with elements of the carbon subgroup (C, Si, Ge, Sn, Pb) / A.G. Moraczewski, A.I. Demidov; Edited by A.A. Popovich. – SPb.: Publ. Polytechnic University, 2016. – 151 p.
- [11] **K. Ji**, Lithium intercalation into bilayer graphene / K. Ji et al. // Nature Communications. – 2019. – V. 10. – Article № 275.
- [12] **C. Mao**, Selecting the Best Graphite for Long-Life, High-Energy Li-Ion Batteries / C. Mao et al. // Journal of The Electrochemical Society. – V. 165. – № 9. – A1837.
- [13] **Z. Yan**, Pulverization Control by Confining Fe₃O₄ Nanoparticles Individually into Macropores of Hollow Carbon Spheres for High-Performance Li-ion Batteries / Z. Yan et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – V. 10. – № 3. – R. 2581–2590.
- [14] **M.U.M. Patel**, Comparative Study of Polysulfide Encapsulation in the Different Carbons Performed by Analytical Tools / M.U.M. Patel, R. Dominko // Ceramic Materials for Energy Applications V: A Collection of Papers Presented at the 39th International Conference on Advanced Ceramics and Composites. – 2015. – V. 36. – № 7. – R. 85–100.
- [15] **P. Dong**, Chemically treated carbon black waste and its potential applications / P. Dong et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2018. – V. 321. – R. 62–72.

THE AUTHORS

TYURIKOVA Irina A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: polatayko_irina@spbstu.ru

DEMIDOV Aleksandr I. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: demidov1902@gmail.com

NOVIKOV Pavel A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: novikov.p.a@gmail.com

TYURIKOV Kirill S. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: kirill.tyurikov@spbstu.ru

Received: 15.10.2020