

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПРИ ЦИКЛИРОВАНИИ В ГАЛЬВАНСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ*

*А.Н. Воронай^{1,2}, Ю.В. Суловикин³, А.В. Лавренов³,
И.В. Резанов³, М.Н. Ильина²*

¹ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ»»

д. 10а, ул. Школьная, г. Дубна, Московская обл., 141981, Россия
тел.: +7(496)219-88-00

²Государственный университет Дубна

д. 19, ул. Университетская, г. Дубна, Московская обл., 141982, Россия
тел.: +7(496)216-27-27

³Центр новых химических технологий ИК СО РАН
д. 54, ул. Нефтезаводская, г. Омск, 644040, Россия
тел.: +7(3812)67-33-32; e-mail: rezanov_ilya@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.84-92

Заключение совета рецензентов: 03.12.19 Заключение совета экспертов: 09.12.19 Принято к публикации: 16.12.19

В современном мире растет интерес к суперконденсаторам как накопителям энергии для микроэлектроники. Развитие систем накопления энергии связано с развитием технологий получения новых материалов, в частности новых пористых углеродных материалов. Привлекательность этих материалов обусловлена уникальным сочетанием химических и физических свойств углерода, а именно: высокой электрической проводимостью; развитой удельной поверхностью; коррозионной стойкостью; термической устойчивостью; контролируемой пористой структурой; эксплуатационными характеристиками и возможностью использования в составе композиционных материалов; высокой чистотой; относительно низкой стоимостью конечного продукта.

В рамках данной работы путем термогазохимической обработки технического углерода был получен экспериментальный образец сверхэлектропроводного технического углерода с необходимыми физико-химическими свойствами. В качестве объекта сравнения был выбран один из самых часто применяемых при производстве суперконденсаторов активированных углей – Norit DLC Supra 30.

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров пористой структуры, а также электрохимических свойств экспериментального сверхэлектропроводного высокопористого технического углерода при циклировании в гальваностатическом режиме в растворе серной кислоты (3,55 М H₂SO₄). Проведена сравнительная оценка параметров пористой структуры и распределение пор по размеру объектов исследования – ВПУ ТК-7 и Norit DLC Supra 30. Установлено, что по сравнению с существующим коммерческим образцом углеродного материала Norit DLC Supra 30, имеющим более узкое распределение пор по размеру, экспериментальный образец высокопористого сверхэлектропроводного технического углерода ВПУ ТК-7 имеет более высокие показатели стабильности и удельной емкости. Это может быть связано с его химической чистотой и условиями синтеза, благодаря которым сформированы оптимальные структурные и текстурные свойства. Дальнейшие исследования определяют условия целенаправленного синтеза специальных отечественных углеродных материалов для различных электрохимических систем.

*Воронай А.Н., Суловикин Ю.В., Лавренов А.В., Резанов И.В., Ильина М.Н. Исследование стабильности технического углерода при циклировании в гальваностатическом режиме // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;01-06:84-92.



Ключевые слова: сверхэлектропроводный технический углерод; суперконденсатор; пористая структура; гальваностатический режим.

STUDY ON THE CARBON BLACK STABILITY DURING CYCLING IN GALVANOSTATIC MODE

A.N. Voropay^{1,2}, Yu.V. Surovikin³, A.V. Lavrenov³, I.V. Rezanov³, M.N. Ilyina²

¹Closed Joint-Stock Company "TEHNOKOMPLEKT"
10a Shkol'naya Str., Dubna, Moscow Reg., 141981, Russia
tel.: +7(496)219 88 00

²Dubna State University
19 Universitetskaya Str., Moscow Reg., 141982, Dubna, Russia
tel.: +7(496)216 27 27

³Center of New Chemical Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
54 Neftezhavodskaya Str., Omsk, 644040, Russia
tel.: +7(3812)67 33 32

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.84-92

Referred 3 December 2019 Received in revised form 9 December 2019 Accepted 16 December 2019

Nowadays interest in supercapacitors as energy storage devices for microelectronics is growing. The development of energy storage systems is related to the development of technologies for producing new materials, in particular the new porous carbon materials. The attraction of these materials is due to the unique combination of chemical and physical properties of carbon, namely: high electrical conductivity; developed specific surface area; corrosion resistance; thermal stability; controlled porous structure; operational decisions and a possibility of use as a part of composite materials; high purity; relatively low cost of the final product.

In this work, we have obtained an experimental sample of superconducting carbon black with the necessary physical and chemical properties by thermal-gas-chemical processing of carbon black. One of the most common activated carbons used in the supercapacitors production – Norit DLC Supra 30 was chosen as the object for comparison.

The paper presents the results of experimental studies of the porous structure parameters as well as the electrochemical properties of the experimental superconducting highly porous carbon black during cycling in the galvanostatic mode in a solution of sulfuric acid (3.55 M H₂SO₄). Moreover, it provides a comparative assessment of the porous structure parameters and distribution of the pores according to the size of the research objects – VPU TK-7 and Norit DLC Supra 30. We have found that the experimental sample of the highly porous superconducting carbon black VPU TK-7 has higher stability and specific capacity indicators compared with the existing commercial Norit DLC Supra 30 carbon material sample which has a narrower pore size distribution. Apparently, this might be related to its chemical purity and synthesis conditions, due to which the optimal structural and textural properties are formed. Further studies will determine the conditions for the targeted synthesis of special domestic carbon materials for various electrochemical systems.

Keywords: superconducting carbon black; supercapacitor; porous structure; galvanostatic mode.



Александр Николаевич Воропай
Aleksandr Voropay

Сведения об авторе: канд. хим. наук, руководитель направления, ЗАО «МППОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ»».

Образование: КемГУ (2011 г.).

Область научных интересов: химические источники тока.

Публикации: 44.

ORCID: 0000-0002-5930-4506

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, Project Director, CJSC Technocomplekt.

Education: KemSU, 2011.

Research interests: chemical power source.

Publications: 44.





Юрий Витальевич Суrowикин
Yuri Surovikin

Сведения об авторе: канд. тех. наук, зав. ЛТУКМ, ЦНХТ ИК СО РАН.

Образование: ОмГУ (1981 г.).

Область научных интересов: углеродные материалы; химическая технология переработки углеводородов; химические источники тока.

Публикации: 150.

H-index – 7

ORCID: 0000-0003-4627-5416

ResearcherID: D-8508-2014.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Head of Laboratory, Center of New Chemical Technologies BIC.

Education: Dostoevsky Omsk State University, 1981.

Research interests: carbon materials; chemical technology for the processing of hydrocarbons; chemical power sources.

Publications: 150.



Александр Валентинович Лавренов
Alexander Lavrenov

Сведения об авторе: д-р хим. наук, директор, ЦНХТ ИК СО РАН.

Образование: ОмГУ (1995 г.).

Область научных интересов: каталитические процессы; углеродные материалы; аккумулялирование энергии; литий-ионные источники тока.

Публикации: 360.

H-index – 10

ORCID: 0000-0002-9246-7964

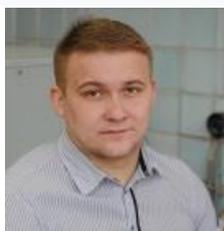
ResearcherID: E-1815-2014

Information about the author: D.Sc. in Chemistry, Director of the Center of New Chemical Technologies BIC.

Education: Dostoevsky Omsk State University, 1995.

Research interests: catalytic processes; carbon materials; energy storage; lithium ion battery.

Publications: 360.



Илья Валерьевич Резанов
Ilya Rezanov

Сведения об авторе: младший научный сотрудник, ЦНХТ ИК СО РАН.

Образование: ОмГТУ (2008 г.).

Область научных интересов: углеродные материалы; химическая технология органических веществ; химические источники тока.

Публикации: 26.

H-index – 4

ORCID: 0000-0003-0890-7240

ResearcherID: D-8623-2014

Information about the author: Researcher, Center of New Chemical Technologies BIC.

Education: OmSTU, 2008.

Research interests: carbon materials; chemical technology of organic substances; chemical power sources.

Publications: 26.



Мария Николаевна Ильина
Maria Ilyina

Сведения об авторе: студент, инженер ООО «ИОН».

Образование: Государственный университет «Дубна» (2019 г.).

Область научных интересов: химические источники тока.

ORCID: 0000-0001-9387-8370

Information about the author: Student, Engineer at “Ion” LTD.

Education: Dubna State University, 2019.

Research interests: chemical power source.

1. Введение

Суперконденсаторы (СК) имеют большие перспективы как компактные устройства накопления энергии для различной портативной электроники, поскольку могут заряжаться практически любыми токами и обладают высокой плотностью энергии по сравнению с классическими конденсаторами [1]. Благодаря этим свойствам, изготовление СК является динамично развивающейся областью, отличающейся многообразием конструктивных решений и характеристиками конечных изделий, что связано с использованием различных вариантов составов электродов и электролитов [2, 3].

Ключевым компонентом данного технического устройства является электрод, к которому предъявляются требования по наличию высокой удельной поверхности, оптимальной пористой структуре, высокой электропроводности. Оптимизация этих параметров, согласно литературным данным [4–11], является наиболее важным фактором при создании СК идеального типа. В качестве наиболее перспективных материалов для активного компонента электрода СК рассматриваются наноразмерные углеродные материалы с повышенной электропроводностью, которые обладают большим значением удельной площади поверхности, коррозионной устойчивостью в растворах любых видов электролитов, температурной стабильностью и контролируемой пористой



структурой. Среди различных видов и форм наноразмерных углеродных материалов (нанотрубки, фуллерены, наносферы, графены и т.д.), которые испытаны в качестве компонентов электродов при разработке идеального СК, наибольшую практическую значимость представляет нанодисперсный углерод, или технический углерод (ТУ), прежде всего серийных марок, обладающий повышенными электропроводными свойствами. В настоящее время ТУ применяют в промышленных масштабах в качестве электропроводящего компонента электродной массы практически во всех конструкциях и типах электрохимических накопителей энергии как отечественных, так и зарубежных производителей.

При наличии отечественных версий СК в РФ отсутствует производство сверхэлектропроводного ТУ. Основными мировыми производителями такого углерода являются: Cabot Corporation, США; Akzo Nobel, Нидерланды; Evonik Industries, Германия; Imerys Graphite&Carbon, Швейцария. Эти компании выпускают такие марки, как Printex XE2-B, Ketjen EC600, Black Pearl 2000, Ensaco 350G и др., при этом технологические приемы синтеза данных материалов являются предметами ноу-хау фирм-разработчиков. В этой связи ликвидация зависимости от зарубежных поставщиков при разработке стратегической продук-

ции нового поколения является весьма важной и актуальной задачей.

Основной проблемой при целенаправленном синтезе сверхэлектропроводного ТУ является отсутствие систематических исследований генезиса его структуры, текстуры и морфологии по мере получения, проводимых одновременно с детальным анализом общего и локального строения различных участков углеродных частиц и, особенно, приповерхностных слоев. Например, в работах [12, 13] в результате высокотемпературной обработки и активации ТУ исследовали только изменения его микроструктуры и текстуры, а в работах [14, 15] – только электропроводность порошков без взаимосвязи с микроструктурой. В [16] авторы предприняли попытку установить взаимосвязь между структурными элементами ТУ и электропроводностью, однако применяли ограниченное число методов исследования микроструктуры, не измеряли электропроводность и не оказывали какого-либо модифицирующего воздействия на ТУ.

В данной работе исследуется возможность применения в качестве материалов для электродов СК специального сверхэлектропроводного высокопористого технического углерода (ВПТУ), синтезированного в лабораторных условиях путем термогазохимической обработки ТУ [17].



Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
<i>d</i>	Диаметр, нм
<i>P</i>	Давление, атм
<i>S</i>	Площадь, м ² /г
<i>V</i>	Объем пор, см ³ /г
<i>Индексы нижние</i>	
Σ	Суммарный
μ	Микро
адс	Адсорбционная
дес	Десорбционная
ТОЗМ	Теория объемного заполнения микропор
<i>Аббревиатуры</i>	
АУ	Активированный уголь
БЭТ	Метод Брунауэра, Эммета и Теллера
ГН	Гигиенический норматив
ДЭС	Двойной электрический слой
КПД	Коэффициент полезного действия
ТУ	Технический углерод
<i>Единицы измерения</i>	
мВ	Милливольты
мВ/с	Милливольт в секунду
мФ/м ²	Миллифарад на метр квадратный
Ф/г	Фарад на грамм

2. Теоретическая часть

В качестве объекта исследования использовали образец ВПТУ ТК-7, полученный термоокислительным пиролизом жидких углеводородов в условиях опытно-промышленного производства ЦНХТ ИК СОРАН и последующей постобработкой в среде во-

дяного пара при 900 °С [14]. В качестве объекта сравнения использовали активированный уголь (АУ) марки Norit DLC Supra 30, который применяется для изготовления СК.

Параметры пористой структуры и распределение пор по размеру объектов исследования приведены в табл. 1 и на рис. 1. Распределение пор по размеру



определяли по изотермам «адсорбции – десорбции» азота (77 К) с помощью метода Dellimore – Heal [18].

Изотермы адсорбции получали на установке Sorptomatic-1900, «Carlo Erba Instruments».

Таблица 1

Параметры пористой структуры

Table 1

Parameters of the porous structure

Образец	$S_{БЭТ}, м^2/г$	$V_{μ, тозм}, см^3/г$	$V_{Σ}$ при $P/P_s = 0,996,$ $см^3/г$	$d_{БЭТ}, нм$	$d_{дес}, нм$	$d_{алс}, нм$	$V_{μ} / V_{Σ}$
Norit DLC Supra 30	1541	0,63	0,80	2,2	6,9	9,0	0,79
ВПУ ТК-7	1363	0,52	2,59	8,6	24,9	26,1	0,20

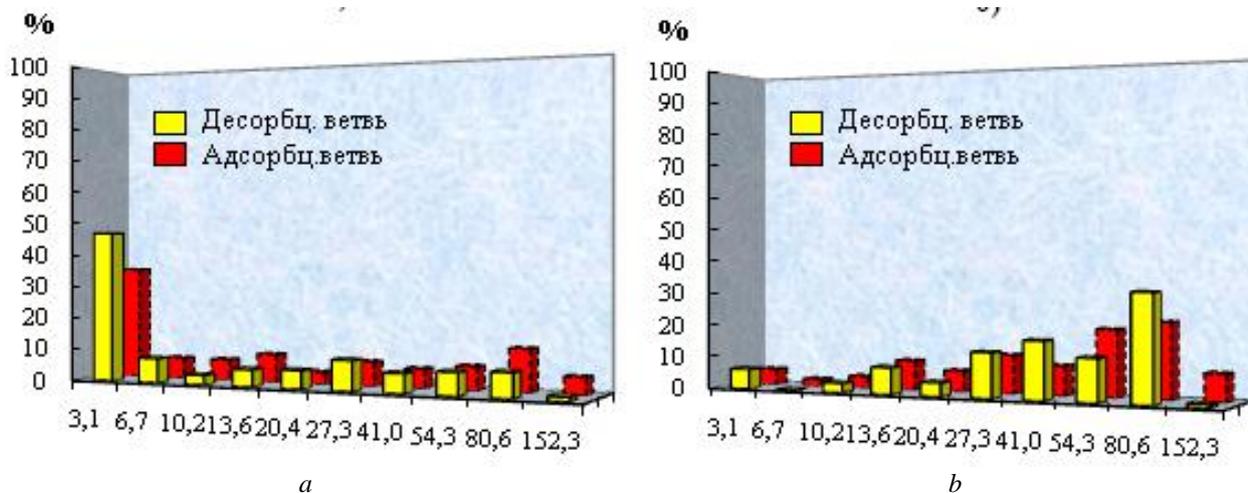


Рис. 1 – Распределение пор по размерам в диапазоне 3,1+179,2 нм: а – Norit DLC Supra 30; б – ВПУ ТК-7
Fig. 1 – Pore size distribution in the range 3.1+179.2 nm: a – Norit DLC Supra 30; b – VPTU TK-7

3. Экспериментальная часть

Электрохимические исследования материалов проводились на потенциостате Elins P20X8.

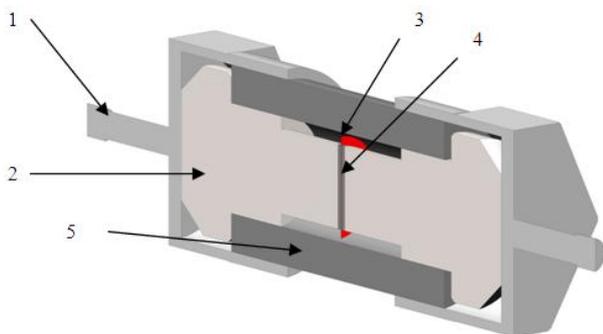


Рис. 2 – 3D-модель 2-х электродной ячейки:
1 – стальные гайки с контактными выводами; 2 – поршневые стальные электроды; 3 – мембрана; 4 – таблетка исследуемого материала; 5 – фторопластовый корпус ячейки
Fig. 2 – 3D-model of a 2-electrode cell: 1 – steel nuts with contact leads; 2 – piston steel electrodes; 3 – membrane; 4 – tablet of the test material; 5 – fluoroplastic cell body

Образцы прессовались в таблетки диаметром 10 мм и толщиной $0,4 \pm 0,6$ мм. Давление прессования составляло 40 атм в течение 5 мин. После этого таблетки переносились в 2-х электродную ячейку типа «Swagelock» (рис. 2) с сепаратором МФФК-3Г (ЗАО НТЦ «Владипор») и скручивались с небольшим усилием. Затем ячейка заполнялась 3,55 М раствором серной кислоты и выдерживалась 4 ч для пропитки таблеток. Далее проводились измерения: сначала циклическая развертка аналогично работе [19] для «тренировки» образца, а затем исследование в гальваностатическом режиме.

4. Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены CVs-кривые образцов. Наличие пика в области от -500 мВ до 500 мВ указывает на наличие обратимых фарадеевских процессов, которые могут быть причиной разрушения материала электрода [20] или приводить к увеличению удельной емкости за счет вклада псевдоемкости [8, 9].

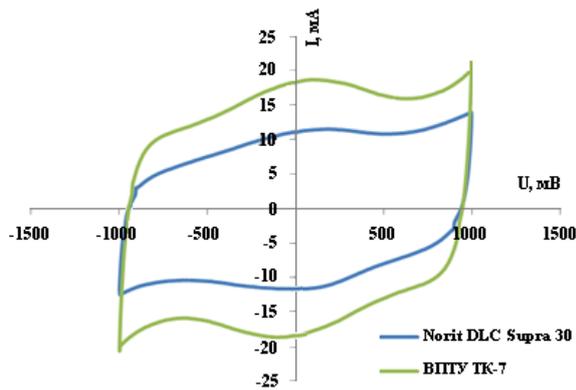


Рис. 3 – CVs-кривые образцов ВПТУ ТК-7 и Norit DLC Supra 30 при скорости сканирования 10 мВ/с
Fig. 3 – CVs curves of VPTU TK-7 and Norit DLC Supra 30 samples at a scan speed of 10 mV /s

Исследования в гальваностатическом режиме показали, что материал ВПТУ ТК-7 обладает большей удельной емкостью (рис. 4а) по сравнению с материалом сравнения Norit DLC Supra 30, имеющим более высокую поверхность. Установлено, что с повышением плотности тока емкость ВПТУ ТК-7 снижается медленнее (рис. 4б), что связано, видимо, с более доступной для электролита поверхностью пор, когда диффузных ограничений для движения ионов электролита в объеме опытного электрода меньше по сравнению с Norit DLC Supra 30.

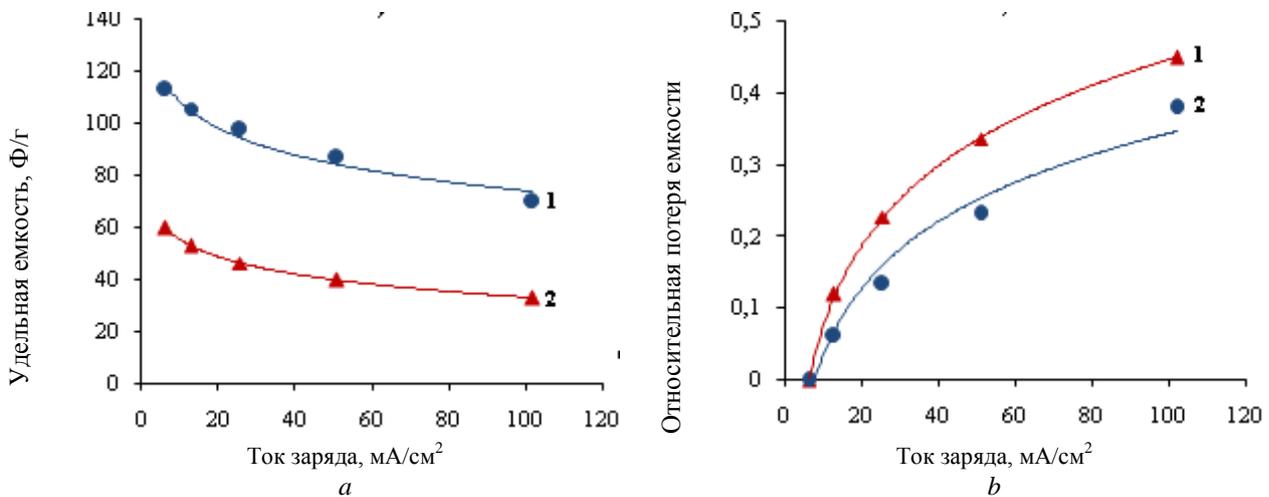


Рис. 4 – Емкость образцов: а) зависимость емкости образцов: 1 – ВПТУ ТК-7 и 2 – Norit DLC Supra 30 от плотности тока; б) потеря емкости образцов: 1 – Norit DLC Supra 30 и 2 – ВПТУ ТК -7 и по мере увеличения плотности тока относительно емкости при 6 мА/см²
Fig. 4 – Sample capacitance: а) dependence of sample capacitance: 1 – VPTU TK-7 and 2 – Norit DLC Supra 30 on current density; б) loss of sample capacity: 1 – Norit DLC Supra 30 and 2 – VPTU TK-7 and with increasing current density relative to capacity at 6 mA/cm²

Рассчитанные значения емкости на единицу поверхности показывают значительное превосходство высокопористого ТУ. Удельная емкость ВПТУ ТК-7 (58 мФ/м²) почти в три раза больше, чем Norit DLC Supra 30 (21 мФ/м²). Такое значение удельной емкости на единицу поверхности ВПТУ ТК-7 превышает характерное значение удельной поверхностной емкости двойного электрического слоя (ДЭС) [21]. Возможно, такой эффект связан с наличием большого числа микропор, в которых с повышением плотности ДЭС протекает процесс десольватации ионов электролита [22].

Результаты циклирования образцов представлены на рис. 5. Установлено, что пористый углеродный материал Norit DLC Supra 30 сильно деградирует, теряя за 70 000 циклов около 15,3 % (см. рис. 5) от первоначальной емкости, в то время как у ВПТУ ТК-7 потерь не наблюдается. Линейная аппроксимация

кривых заряда и разряда для образца Norit DLC Supra 30 демонстрирует снижение удельной емкости и позволяет предположить, что снижение на 40 % от первоначальной емкости (порог, при котором устройство, собранное с использованием данного материала, будет считаться непригодным для дальнейшего применения) наступит через 142 тыс. циклов. Для материала ВПТУ ТК-7 коэффициент наклона линейной аппроксимации имеет положительное значение, но подтвердить точное количество циклов на данном этапе невозможно, так как для того, чтобы оценить ресурс ТК-7, необходимо провести эксперимент с большим количеством циклов (это планируется сделать в будущем). Однако тенденция к деградации материала ВПТУ ТК-7, как и материала Norit DLC Supra 30 присутствует, что проявляется в различии значений коэффициентов наклона линейной аппроксимации для емкости заряда и емкости разряда. У ВПТУ ТК-7 ем-

кость заряда растет быстрее, чем емкость разряда, что связано с увеличением энергетических затрат на транспорт ионов к поверхности электрода, происходящее, вероятно, вследствие повышения контактного

сопротивления между частицами углерода ВПТУ ТК-7. Следует отметить, что данное явление возможно при разрушении контактной области в результате эрозии поверхности углеродного материала.

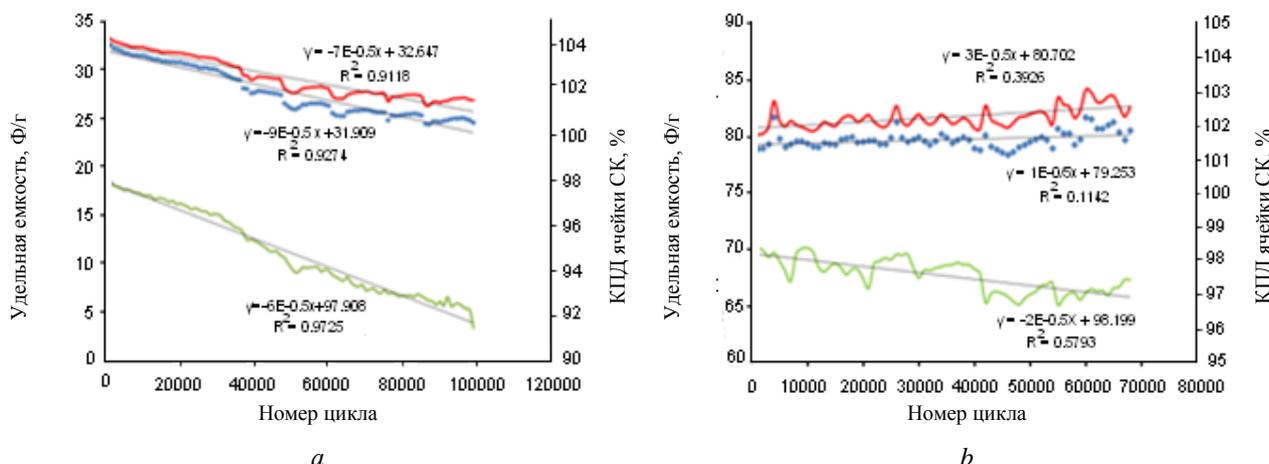


Рис. 5 – Зависимость емкости и КПД ячейки СК при заряде и разряде от номера цикла при плотности тока 100 мА/см². а – образец Norit DLC Supra 30; б – образец ВПТУ ТК-7

Fig. 5 – Dependence of the capacitance and efficiency of an SC cell during charge and discharge on the cycle number at a current density of 100 mA / cm²: а – Norit DLC Supra 30 sample; б – VPTU TK-7

5. Заключение

Применение экспериментального сверхэлектропроводного ВПТУ в качестве материалов для СК перспективно, поскольку данные материалы имеют высокие значения удельной емкости и стабильность при длительной работе, что было подтверждено экспериментами. Высокопористый технический углерод может быть использован в качестве основного компонента электрода для устройств накопления энергии с большим сроком службы.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60419X0228).

Физико-химические исследования образцов проведены с использованием приборной базы ЦКП Национальный центр исследования катализаторов ИК СО РАН, г. Новосибирск.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the federal target program “Research and Development in Priority Directions for the Development of the Russian Science and Technology Complex for 2014–2020” (unique identifier ASR RFMEFI60419X0228).

Physical and chemical studies of the samples were carried out using the instrumentation base of the Central Control Center National Institute for the Study of Catalysts of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.

Список литературы

- [1] Lin Z., Goikolea E., Balducci A., Naoi K., Taberna P.-L., Salanne M., Yushin G., Simon P. Materials for supercapacitors: When Li-ion battery power is not enough / Lin Z. [et al.] // Materials Today. – 2018. – Vol. 1. – P. 1–18.
- [2] Simon, P. Materials for electrochemical capacitors / P. Simon, Yu. Gogotsi // Nature Materials. – 2008. – Vol. 7. – P. 845–854.
- [3] Frackowiak E., Beguin F. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors// Carbon. – 2001. – Vol. 39. – No. 11. – P. 937–950.
- [4] Pandolfo, A.G. Carbon properties and their role in supercapacitors / A.G. Pandolfo, A.F. Hollenkamp // J. of Power Sources. – 2006. – Vol. 157. – No. 1. – P. 11–27.
- [5] Alar J., Heisi K., Enn L. Effect of ball-milling technology on pore structure and electrochemical properties of activated carbon / J. Alar, K. Heisi, L. Enn // Carbon. – 2007. – Vol. 45. – No. 6. – P. 1226–1233.

[6] Muzaffara, A. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: design, fabrication and applications, *Renew / A. Muzaffara [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – Vol. 101. – P. 123–145.

[7] Десятов, А.В. Исследование электрохимического поведения макетных образцов накопителей энергии с углеродными электродами / А.В. Десятов [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 6. – С. 645–656.

[8] Ike, I. The Effects of Self-Discharge on the Performance of Symmetric Electric Double-Layer Capacitors and Active Electrolyte-Enhanced Supercapacitors: Insights from Modeling and Simulation / I. Ike [et al.] // *J. Power Sources*. – 2015. – Vol. 273. – P. 64–77.

[9] Devillers N., Electrolytes for Electrochemical Supercapacitors / N. Devillers [et al.] // *J. Power Sources*. – 2014. – Vol. 246. – P. 596–608.

[10] González, A. Review on supercapacitors: Technologies and materials / A. González [et al.] // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2011. – Vol. 58. – P. 1189–206.

[11] Суrowикин Ю.В., Шайтанов А.Г., Резанов И.В., Сырьева А.В. Термогазохимическая модификация технического углерода: структура и свойства // Технологическое горение: коллективная монография / Под общ. ред. акад. С.М. Алдошина, чл.-корр. РАН М.И. Алымова: Гл. 7. М.: Изд-во РАН. – 2018. – С. 161–191.

[12] Gruber T., Zerda T., Gerspacher M. Raman studies of heat-treated carbon blacks // *Carbon*. – 1994. – Vol. 32. – P. 1377–1382.

[13] Pawlyta, M. Raman microspectroscopy characterization of carbon blacks: spectral analysis and structural information / M. Pawlyta, J.-N. Rouzaud, S. Duber // *Carbon*. – 2015. – Vol. 84. – P. 479–490.

[14] Wang, M.-X. Electrolyte fuel cells using steam etching / M.-X. Wang // *Mater. Chem. Phys.* – 2010. – Vol. 123. – P. 761–766.

[15] Pantea, D. Electrical conductivity of conductive carbon blacks: Influence of surface chemistry and topology / D. Pantea // *Appl. Surf. Sci.* – 2003. – Vol. 217. – P. 181–193.

[16] Celzard A. Electrical conductivity of carbonaceous powders / A. Celzard // *Carbon*. – 2002. – Vol. 40. – P. 2801–2815.

[17] Суrowикин, Ю.В. Formation the properties of carbon black particles by gas-phase thermochemical modification / Yu.V. Суrowикин // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2019. – Vol. 10. – No. 2. – P. 479–494.

[18] Dollimore, D. An improved method for the calculation of pore size distribution from adsorption data / D. Dollimore, G.R. Heal // *J. Appl. Chem.* – 1964. – Vol. 14. – P. 109–114.

[19] Пузынин, А.В. Использование высокопористых углеродных материалов, наполненных гидроксидом металла в качестве электродов суперконденсатора / А.В. Пузынин [и др.] // Вестник Кемеровско-

го государственного университета. – 2014. – Т. 3. – С. 238–241.

[20] Воропай А.Н., Суrowикин Ю.В., Резанов И.В. Исследование электрохимического поведения ионной жидкости с пористыми углеродными материалами на основе технического углерода / А.Н. Воропай, Ю.В. Суrowикин, И.В. Резанов // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2018. – Т. 6. – С. 165–170.

[21] Zakharov, Yu.A. Highly porous carbon materials filled with nickel hydroxide nanoparticles; synthesis, study, application in electrochemistry / Yu.A. Zakharov [et al.] // *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2015. – Vol. 17. – P. 187–191.

[22] Zakharov, Yu.A. Nanostructured composites based on porous carbon matrices filled with nickel hydroxide crystallites / Yu.A. Zakharov [et al.] // *Inorganic Materials*. – 2015. – Vol. 51. – No. 4. – P. 405–411.

References

[1] Lin Z., Goikolea E., Balducci A., Naoi K., Taberna P.-L., Salanne M., Yushin G., Simon P. Materials for supercapacitors: When Li-ion battery power is not enough. *Materials Today*, 2018;1:1–18 (in Eng.).

[2] Simon P., Gogotsi Yu. Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 2008;7:845–854 (in Eng.).

[3] Frackowiak E., Beguin F. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors. *Carbon*, 2001;39(11):937–950 (in Eng.).

[4] Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors. *J. of Power Sources*, 2006;157(1):11–27 (in Eng.).

[5] Alar J., Heisi K., Enn L. Effect of ball-milling technology on pore structure and electrochemical properties of activated carbon. *Carbon*, 2007;45(6):1226–1233 (in Eng.).

[6] Muzaffara A., Ahamed M.B., Deshmukha K., Thirumalai J. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: design, fabrication and applications, *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019;101:123–145 (in Eng.).

[7] Desyatov A.V., Kolesnikov V.A., Kryukov A.Yu., Milyutina A.D., Kolesnikov A.V. Investigation of the electrochemical behavior of prototype energy storage devices with carbon electrodes (Teoreticheskiye osnovy traditsionnoy tekhnologii). *Theoretical Foundations of General Technologies*, 2016;50(6):645–656 (in Russ.).

[8] Ike I., Sigalas I., Iyuke S., Ozoemena K. The Effects of Self-Discharge on the Performance of Symmetric Electric Double-Layer Capacitors and Active Electrolyte-Enhanced Supercapacitors: Insights from Modeling and Simulation. *J. Power Sources*, 2015;273:64–77 (in Eng.).

[9] Devillers N., Jemei S, Péra M-C, Bienaimé D, Gustin F. Electrolytes for Electrochemical Supercapacitors. *J. Power Sources*, 2014; 246: 596–608 (in Eng.).

[10] González A., Goikolea E., Barrena J.A., Mysyk R. Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2011;58:1189–1206 (in Eng.).



[11] Surovikin Yu.V., Shaitanov A.G., Rezanov I.V., Syryeva A.V. Thermogasochemical modification of carbon black: structure and properties (Termogazokhimicheskaya modifikatsiya tekhnicheskogo ugleroda: struktura i svoystva kollektivnaya monografiya). Technological Combustion (Tekhnologicheskoye gorenije): Collective Monograph / Ed. ed. Acad. CM. Aldoshina, Corr. RAS M.I. Alyмова. Ch. 7. M.: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 2018; pp. 161–191 (in Russ.).

[12] Gruber T., Zerda T., Gerspacher M. Raman studies of heat-treated carbon blacks. *Carbon*, 1994;32:1377–1382 (in Eng.).

[13] Pawlyta M., Rouzaud J.-N., Duber S. Raman microspectroscopy characterization of carbon blacks: spectral analysis and structural information. *Carbon*, 2015;84:479–490 (in Eng.).

[14] Wang M.-X. Electrolyte fuel cells using steam etching. *Mater. Chem. Phys*, 2010;123:761–766 (in Eng.).

[15] Pantea D. Electrical conductivity of conductive carbon blacks: Influence of surface chemistry and topology. *Appl. Surf. Sci*, 2003;217:181–193 (in Eng.).

[16] Celzard A. Electrical conductivity of carbonaceous powders. *Carbon*, 2002;40:2801–2815 (in Eng.).

[17] Surovikin Yu.V., Shaitanov A.G., Rezanov I.V., Syryeva A.V. Formation the properties of carbon black particles by gas-phase thermochemical modification. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019;10(2):479–494 (in Eng.).

[18] Dollimore D., Heal G.R. An improved method for the calculation of pore size distribution from adsorption data. *J. Appl. Chem*, 1964;14:109–114 (in Eng.).

[19] Puzynin A.V., Samarov A.V., Voropay A.N., Kozlov A.P., Barnakov Ch.N., Ismagilov Z.R. Use of highly porous carbon materials filled with metal hydroxide as electrodes of a supercapacitor (Ispol'zovaniye vysokoporistykh uglerodnykh materialov, napolnennykh gidroksidom metalla v kachestve elektrodov superkondensatora). *Bulletin Kemerovo State University (Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2014;3:238–241 (in Russ.).

[20] Voropay A.N., Surovikin Yu.V., Rezanov I.V. Investigation of the electrochemical behavior of an ionic liquid with porous carbon materials based on carbon black (Issledovaniye elektrokhimicheskogo povedeniya ionnoy zhidkosti s poristymi uglerodnymi materialami na osnove tekhnicheskogo ugleroda). *Dynamics of systems, mechanisms and machines (Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin)*, 2018;6:165–170 (in Russ.).

[21] Zakharov Yu.A., Voropay A.N., Fedorova N.M., Pugachev V.M., Puzynin A.V., Barnakov Ch.N., Ismagilov Z.R., Manina T.S. Highly porous carbon materials filled with nickel hydroxide nanoparticles; synthesis, study, application in electrochemistry. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2015;17:187–191 (in Eng.).

[22] Zakharov Yu.A., Ismagilov Z.R., Voropai A.N., Manina T.S., Barnakov Ch.N., Samarov A.V., Pugachev V.M., Kolmykov R.P., Dodonov V.G. Nanostructured composites based on porous carbon matrices filled with nickel hydroxide crystallites. *Inorganic Materials*, 2015;51(4):405–411 (in Eng.).

Транслитерация по BSI



With the ever pressing sustainability & recycling, the fluctuation of feedstock prices, the European carbon black industry is facing changes in the near future. The industry will need to adapt to these new objectives & developments, and work together as a whole to ensure a smooth & thriving transition.

ACI's 2nd European Carbon Black Summit will be taking place in Frankfurt, Germany on 24 & 25 June 2020. The two day event will bring together the senior representatives of the different stakeholders involved in this sector from producers, technology developers, rubber producers, chemical suppliers, researchers, as well as other influential stakeholders from the value chain.

Join us at the Summit to discover the key topics and updates from the latest developments in essential areas of this industry.

Key Topics:

- International Market Review of the Carbon Black Industry
- The Improvements and Technology Advances in the Production Process
- Evolving Sustainability: Introducing Recovered Carbon Black (Part 1)
- Evolving Sustainability: Introducing Recovered Carbon Black (Part 2)
- etc.

<https://www.wplgroup.com/aci/event/carbon-black-summit/>

