

Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 4. С. 207–216

*Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 207–216

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-4-207-216>, EDN: UVGNJG

Научная статья

УДК 541.136

## О ВЛИЯНИИ ДОЛИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ПОРИСТОСТЬЮ, НА ЛИНЕЙНОСТЬ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОЙНОСЛОЙНЫХ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

Р. М. Кутлимурагов<sup>1✉</sup>, А. Р. Кузнецова<sup>1</sup>, Д. В. Агафонов<sup>1</sup>, Ю. В. Суrowикин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)  
Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26

<sup>2</sup>Центр новых химических технологий ИК СО РАН, Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН  
Россия, 644040, г. Омск, ул. Нефтезаводская, д. 54

**Кутлимурагов Русланбек Муратбаевич**, магистр кафедры технологии электрохимических производств, [guslan.kutlimuratoff@yandex.ru](mailto:guslan.kutlimuratoff@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0005-8565-6547>

**Кузнецова Арина Романовна**, ассистент кафедры технологии электрохимических производств, [arinaspbgti@yandex.ru](mailto:arinaspbgti@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0003-7968-5830>

**Агафонов Дмитрий Валентинович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии электрохимических производств, [phti@lti-gti.ru](mailto:phti@lti-gti.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2669-6136>

**Суrowикин Юрий Витальевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, [suruv@mail.ru](mailto:suruv@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4627-5416>

**Аннотация.** Исследованы электрохимические характеристики нанокomпозиционных материалов на основе технического углерода для двойнослойных суперконденсаторов. Показано, что наиболее высокие значения удельных емкостных характеристик были получены для углеродного материала СП4, обладающего наибольшей удельной поверхностью (полная ёмкость 228 Ф/г, обратимая – 162 Ф/г). Полученные в настоящей работе результаты подчеркивают актуальность рассматриваемой проблемы, необходимость продолжения работы для дополнения полученных экспериментальных данных распределения по порам материалов для определения влияния пористости на физико-химические характеристики.

**Ключевые слова:** суперконденсатор, двойной электрический слой, нанокomпозит, технический углерод

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект АААА-А21-121011890076-8).

**Для цитирования:** Кутлимурагов Р. М., Кузнецова А. Р., Агафонов Д. В., Суrowикин Ю. В. О влиянии доли поверхности углеродного материала, определяемой пористостью, на линейность зарядно-разрядных характеристик двойнослойных суперконденсаторов // Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 4. С. 207–216. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-4-207-216>, EDN: UVGNJG

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## On the influence of the carbon material surface fraction determined by porosity on the linearity of the charge-discharge characteristics of DLSC

R. M. Kutlimuratov<sup>1✉</sup>, A. R. Kuznetsova<sup>1</sup>, D. V. Agafonov<sup>1</sup>, Yu. V. Surovikin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)  
26 Moskovski Ave., St. Petersburg 190013, Russia

<sup>2</sup>Center of New Chemical Technologies, Boreskov Institute of Catalysis,

Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
54 Neftezhavodskaya St., Omsk 644040, Russia

**Ruslanbek M. Kutlimuratov**, ruslan.kutlimuratoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8565-6547>

**Arina R. Kuznetsova**, arinaspbgti@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7968-5830>

**Dmitry V. Agafonov**, phti@lti-gti.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2669-6136>

**Yury V. Surovikin**, suruv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4627-5416>

**Abstract.** The electrical and chemical characteristics of nanocomposite materials based on carbon black for double-layer supercapacitors were investigated. It was shown that the highest values of the specific capacitive characteristics were obtained for carbon material SP4 which has the largest specific surface area (total capacity 228 F/g, reversible capacity 162 F/g). The results obtained in the work show the relevance of the problem under consideration and the necessity to continue the research to supplement the obtained experimental data for the pore distribution of materials in order to determine the influence of porosity on the physical and chemical characteristics.

**Keywords:** supercapacitor, double electric layer, nanocomposite, carbon black

**Acknowledgments.** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of the Institute of Catalysis SB RAS (project AAAA-A21-121011890076-8).

**For citation:** Kutlimuratov P. M., Kuznetsova A. R., Agafonov D. V., Surovikin Yu. V. On the influence of the carbon material surface fraction determined by porosity on the linearity of the charge-discharge characteristics of DLSC. *Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 207–216 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-4-207-216>, EDN: UVGNJG

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из динамично развивающихся направлений в области химических источников тока является разработка и совершенствование электрохимических конденсаторов или суперконденсаторов (СК), основной принцип работы которых построен на заряде/разряде двойного электрического слоя (ДЭС) на границе раздела фаз. В качестве основного компонента при изготовлении электродов используют различные углеродные материалы (УМ) [1].

Основным требованием, предъявляемым СК ДЭС, является большая энергоемкость, которая определяется истинной площадью поверхности УМ.

Помимо развитой поверхности, УМ должны обладать высокими показателями удельной электропроводности, смачиваемости, пористости и электрохимической стабильности. Причем средний размер пор не должен превышать размера сольватированных ионов электролита [2].

Благодаря высокой удельной поверхности (более 1500 м<sup>2</sup>/г) и своей доступности активированный уголь (АУ) является наиболее распространенным электродным материалом промышленных СК ДЭС. В основном АУ изготавливают путем переработки природного сырья (кокосового волокна, рисовой шелухи, жмыха подсолнечника) [3]. Согласно исследованиям СК ДЭС на их основе обладают емкостью около 200 Ф/г [4]. Необходимо отметить, что наиболее распространенные методы синтеза АУ не позволяют контролировать количество и состав поверхностно-активных групп, морфологию и структуру материала, что является немаловажным фактором при изучении электрохимических характеристик СК ДЭС.

Другим известным УМ является графит, хорошо зарекомендовавший себя как анодный материал для литий-ионных аккумуляторов. Но низкая удельная поверхность и непористая структура ограничивают применение такого типа материалов в СК. В работе [5] для увеличения удельной площади поверхности и развития пористой структуры

использовали различные методы активации, которые позволяют использовать данные материалы в СК ДЭС. Достигнутые при этом емкости составили порядка 300 Ф/г в водных растворах. Однако авторы уточняют, что высокой емкостью обладают только свежеприготовленные образцы.

Технический углерод (ТУ) и нанокм-позиты на его основе заслуживают особого внимания среди всех углеродных материалов, нашедших применение в технологии СК ДЭС. Известно, что материалы такого типа обладают емкостью более 80 Ф/г [6]. Привлекательность нанокм-позитов на основе ТУ обусловлена уникальным сочетанием химических и физических свойств, а именно: высокой проводимостью, развитой удельной поверхностью, коррозионной стойкостью, термической устойчивостью, контролируемой пористой структурой.

Основным методом синтеза ТУ является высокотемпературный термоокислительный пиролиз жидких углеводородов каменноугольного и нефтяного происхождения или печной процесс [7]. Данный процесс протекает при сверхзвуковых скоростях потока продуктов реакции, при этом время контакта частиц с продуктами реакции составляет доли миллисекунды, а температуры достигают 1400–1600°C [8].

Сам нанокм-позит состоит, как правило, из двух компонентов – матрицы и армирующего наполнителя [7]. Синтез гранулированных нанокм-позитов – это многостадийный процесс, при котором на каждой следующей ступени задаются новые свойства материала. Благодаря такому подходу на любой из стадий можно получить готовый продукт с заданными параметрами [7]. Основными процессами являются формирование армирующей системы и формирование пироуглеродной матрицы (ПМ). В качестве матрицы выступает пиролитический углерод (ПУ), а частицы ТУ служат армирующим наполнителем. Благодаря осаждению ПУ на пористой поверхности ТУ, эксплуатационные свойства исходного материала существенно изменяются [8]. Данная технология носит название

матричного синтеза гранулированных углерод-углеродных нанокм-позитов.

Помимо выбора армирующего наполнителя и его взаимодействия со связующей ПМ, на параметры пористой структуры углерод-углеродного нанокм-позита также влияет последующая обработка материала, например термоокислительная модификация (ТОМ).

ТОМ проводится при температуре 900°C в подвижном слое в среде водяного пара и углеводородов (при термическом разложении) пропан-бутановой фракции нефтепереработки [9].

Целью данной работы являлось изучение электрохимических свойств нанокм-позитов на основе ТУ в качестве электродных материалов СК ДЭС. В исследовании использовался подход, развитый в работе [6], в которой показано, что нелинейность гальваностатических зарядно-разрядных характеристик не обязательно связана с фарадеевскими процессами.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования являлись нанокм-позиты на основе ТУ с максимальным размером частиц 100 мкм (табл. 1), а также коммерческий графит марки МСМВ (МТИ, США), имеющий минимальную поверхность 1.537 м<sup>2</sup>/г (по данным поставщиков). МСМВ не является материалом, применяемым в технологии СК, но его малая поверхность позволит проследить тенденции появления нелинейности в зарядно-разрядных характеристиках.

**Таблица 1 / Table 1**

Характеристика исследуемых материалов  
Characteristic features of the materials under study

Материал	S <sub>БЭТ</sub> , м <sup>2</sup> /г	Состав, %		
		ТУ	ПМ	ТОМ
СП4	1453	100	40	70
СП7	1266	100	80	70
СП11	747	100	40	25

Электроды изготавливались намазочным способом. В качестве подложки использовалась алюминиевая фольга с праймером на основе углеродных нанотрубок TUBALL (OCSiAl, Россия). В состав активной массы входили: нанокпозиционный материал на основе ТУ, полимерное связующее PVDF (Solvay, Бельгия) и электропроводящая сажа в соотношении 80 : 10 : 10. В качестве растворителя использовался N-метилпирролидон. Нанесение намазки на алюминиевую фольгу проводилось с помощью плёночного аппликатора Doctor Blade (ТОВ, Китай). Итоговая толщина электродной массы составила 150 мкм.

Сборка макетов СК ДЭС проводилась на основе серийных корпусов CR2023 в атмосфере сухого воздуха. Электроды помещались на разных полюсах макета и смазывались электролитом – 0.8М раствором тетрафторбората тетраэтиламмония в триметилфосфате. Сепарационным материалом служил полипропилен. Герметизация корпуса осуществлялась путём завальцовки крышки завальцовочным устройством GN-CC20 (GELON, Китай). Собранные макеты контролировались с помощью вольтметра на отсутствие коротких замыканий и перед электрохимическими исследованиями выдерживались не менее суток для равномерного смазывания электролитом сепаратора и активной массы до достижения равновесия.

Для определения циклического ресурса исследуемых материалов использовался метод гальваностатического циклирования. Измерения проводились при помощи специализированного многоканального стенда LAND ST2001A (Landt, Китай). Тестирование осуществлялось в диапазоне напряжений от 0 до 3 В и при увеличении токовой нагрузки: 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 мкА соответственно.

Вольтамперные зависимости были получены на потенциостате-гальваностате Elinx P-20X (Electrochemical Instruments, Россия) в потенциодинамическом режиме. Проводилось по десять последовательных циклов при

скоростях развёртки в 5 и 50 мВ/с для каждого исследуемого материала.

Ёмкость была рассчитана по полученным вольтамперным характеристикам согласно формулам:

$$C = \int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{кон}}} I dt, \quad (1)$$

где  $I$  – ток, возникающий в макете, А;  $t_{\text{кон}}$  – время окончания цикла, с;  $t_{\text{нач}}$  – время начала цикла, с.

Для перевода ёмкости из Кл, в Ф, использовали выражение:

$$C_{\text{уд}} = \frac{C}{U}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{уд}}$  – удельная ёмкость, Ф;  $U$  – напряжение системы, В.

Общая ёмкость суперконденсатора была рассчитана согласно уравнению

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \quad (3)$$

При сборке макета особое внимание уделялось тому, чтобы электроды имели одинаковую массу. В таком случае  $C_1 = C_2 = 2C$ .

Исходя из этого, ёмкость одного электрода можно найти из формулы

$$C_{\text{эл-да}} = \frac{2 \times C}{m_{\text{ам}}}, \quad (4)$$

где  $m_{\text{ам}}$  – масса электрохимически активного материала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены исходные хронотенциограммы (а, б, в), а также зависимости напряжения макетов от безразмерного времени заряда (а', б', в'). Безразмерный временной параметр, отложенный по оси абсцисс, позволяет наглядно оценить изменения формы зарядных кривых. Для всех исследуемых композиционных материалов (а', б', в') при минимальной токовой нагрузке

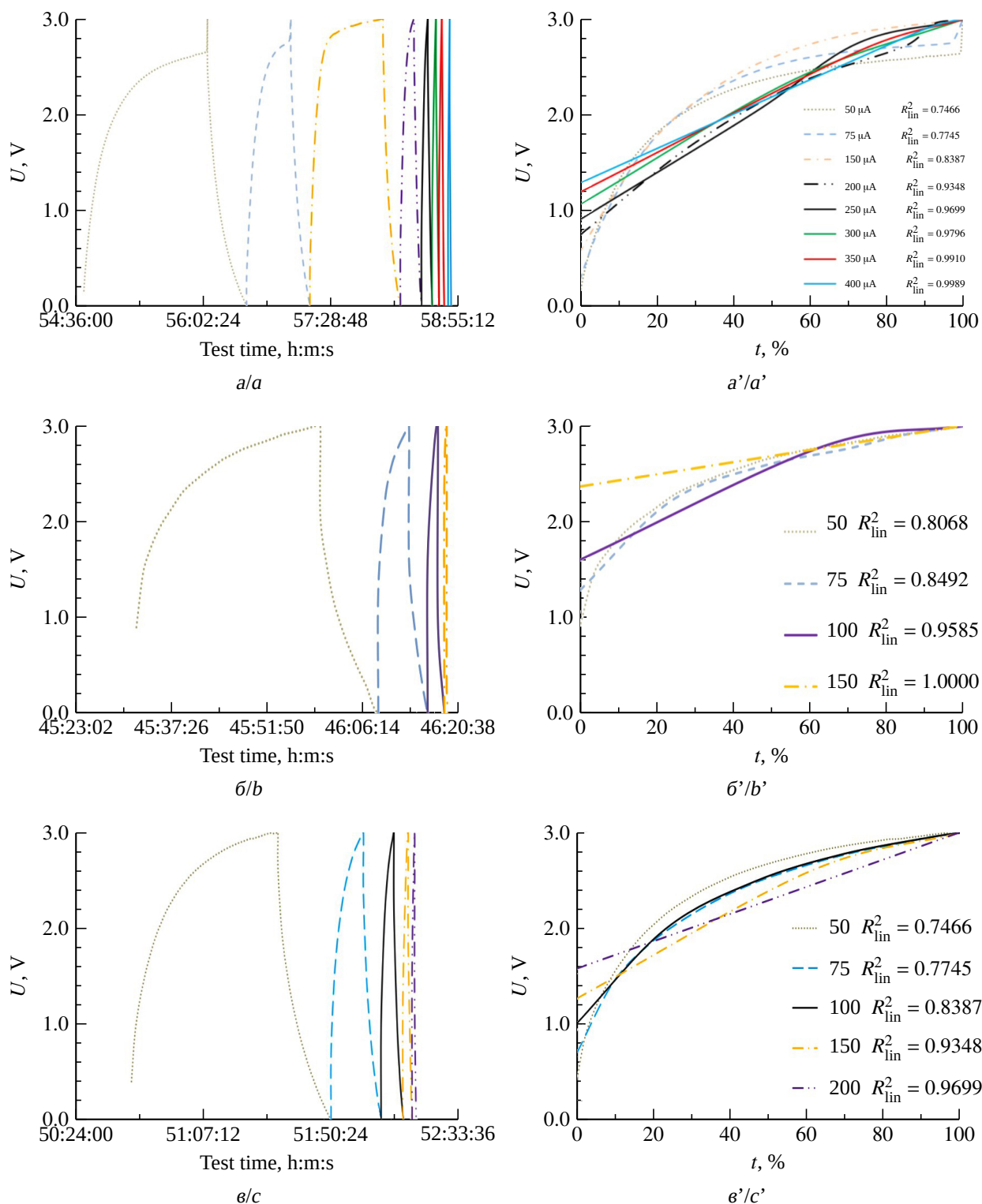


Рис. 1. Гальваностатические зарядно-разрядные кривые (а, б, в) и зарядные кривые (а', б', в') СК ДЭС на основе СП4 (а, а'), СП7 (б, б'), СП11 (в, в') при различных токах. Каждой зарядной кривой в легенде соответствует свой коэффициент корреляции линейной регрессии (цвет онлайн)

Fig. 1. Galvanostatic charge-discharge curves (a, b, c) and charge curves (a', b', c') of EDLC based on SP4 (a, a'), SP7 (b, b'), SP11 (c, c') at different currents. Each charge curve in the legend corresponds to its linear regression correlation coefficient (color online)

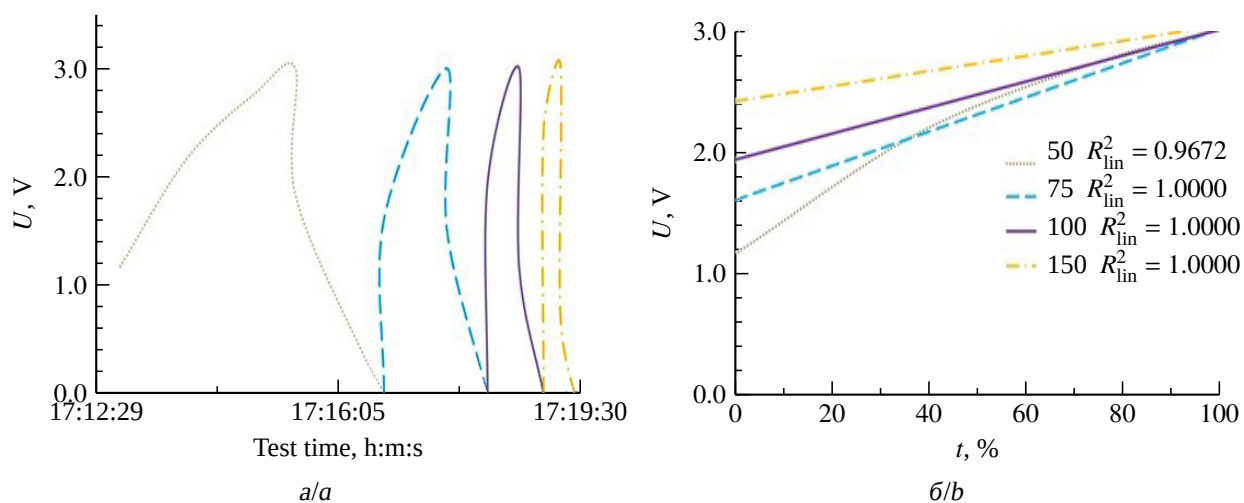


Рис. 2. Гальваностатические зарядно-разрядные кривые (а) и зарядные кривые (б) МСМВ при различных токах. Каждой зарядной кривой в легенде соответствует свой коэффициент корреляции линейной регрессии (цвет онлайн)

Fig. 2. Galvanostatic charge-discharge curves (a) and charge curves (b) of MSMB at different currents. Each charge curve in the legend corresponds to its different linear regression correlation coefficient (color online)

(50 мкА) характерна гиперболическая зависимость напряжения от времени. С увеличением токовой нагрузки наблюдается существенный рост коэффициента корреляции линейной регрессии, что соответствует приближению формы зарядного полуцикла к харак-

терной зависимости при формировании емкости только за счет образования ДЭС.

Для сопоставления были собраны макеты СК ДЭС с активным материалом, имеющим неразвитую удельную поверхность и низкую пористость – МСМВ (рис. 2, а, б).

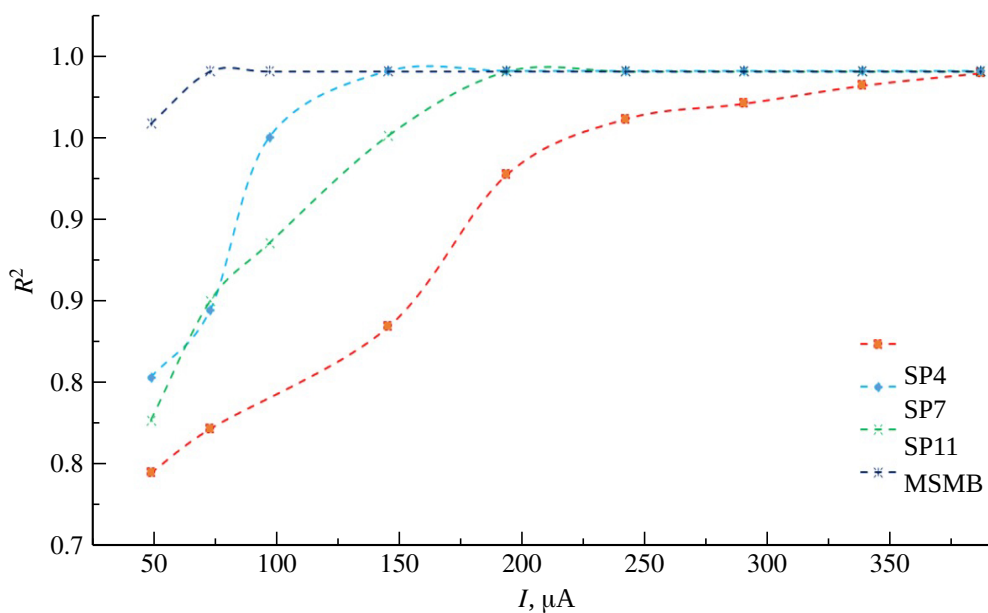


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции линейной регрессии от тока заряда (цвет онлайн)

Fig. 3. The dependence of the linear regression correlation coefficient on the charge current (color online)

Достижение линейности зарядной характеристики для данного материала наблюдается уже при токе 75 мкА.

По полученным коэффициентам регрессии ( $R_{\text{lin}}^2$ ) для кривых заряда при различных токовых нагрузках были построены зависимости  $R_{\text{lin}}^2$  от плотности тока для всех исследованных материалов (рис. 3).

Если сравнить полученные данные (см. рис. 1) с характеристиками материалов (см. табл. 1), заметно, что достижение линейности на меньших токах не связано с уменьшением удельной площади поверхности.

Причина роста коэффициента линейной регрессии с увеличением тока заряда описана в работе [6]. Доказано, что на ход гальваностатических зарядных полуциклов существенно влияет пористость материала. При использовании малых токов ДЭС формируется на максимально доступной площади поверхности углеродного материала. Однако диффузионные ограничения, вызванные наличием пор и неоднородностью поверхности электрода, затрудняют достижение конечного потенциала. В материале МСМВ доля поверхности, определяемой порами широкого спектра, пренебрежимо мала. Как видно на рис. 3, коэффициент корреляции линейной регрессии, равный единице, здесь наблюдает-

ся при минимальных значениях зарядного тока и остаётся постоянным во всём диапазоне токовой нагрузки.

Следует отметить, что увеличение содержания пироуглеродной матрицы в составе материала приводит к достижению линейности при меньших токовых нагрузках. Для более детального изучения электрохимического поведения исследуемых материалов, а также определения их емкостных характеристик были получены циклические вольтамперограммы (ЦВА). При увеличении токовой нагрузки форма ЦВА (рис. 4) стремится к прямоугольной, характерной для СК ДЭС в соответствии с существующими на сегодня представлениями [1].

Рассчитанные значения удельных емкостей исследуемых нанокмозитов приведены в табл. 2. Согласно полученным результатам наиболее высокой удельной емкостью обладает материал СП4, наименьшей – МСМВ. Сравнив площади поверхности исследуемых материалов (см. табл. 1) и их емкостные характеристики, мы не наблюдаем монотонно меняющихся зависимостей ёмкости от удельной площади, поскольку подобрать углеродные материалы с равно меняющейся пористостью практически очень трудно. Вклад макропор, мезопор и микропор в поверх-

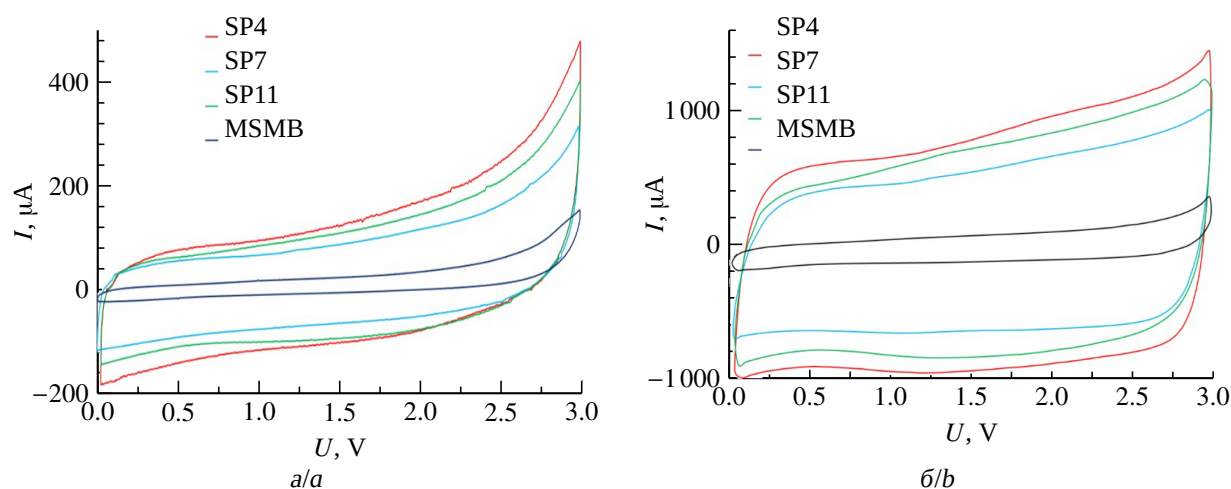


Рис. 4. Циклические вольтамперограммы макетов СК ДЭС при различных скоростях развертки, мВ/с: а – 5, б – 50 (цвет онлайн)

Fig. 4. Cyclic voltammograms of EDLC layouts at different sweep rates, mV/s: a – 5, b – 50 (color online)

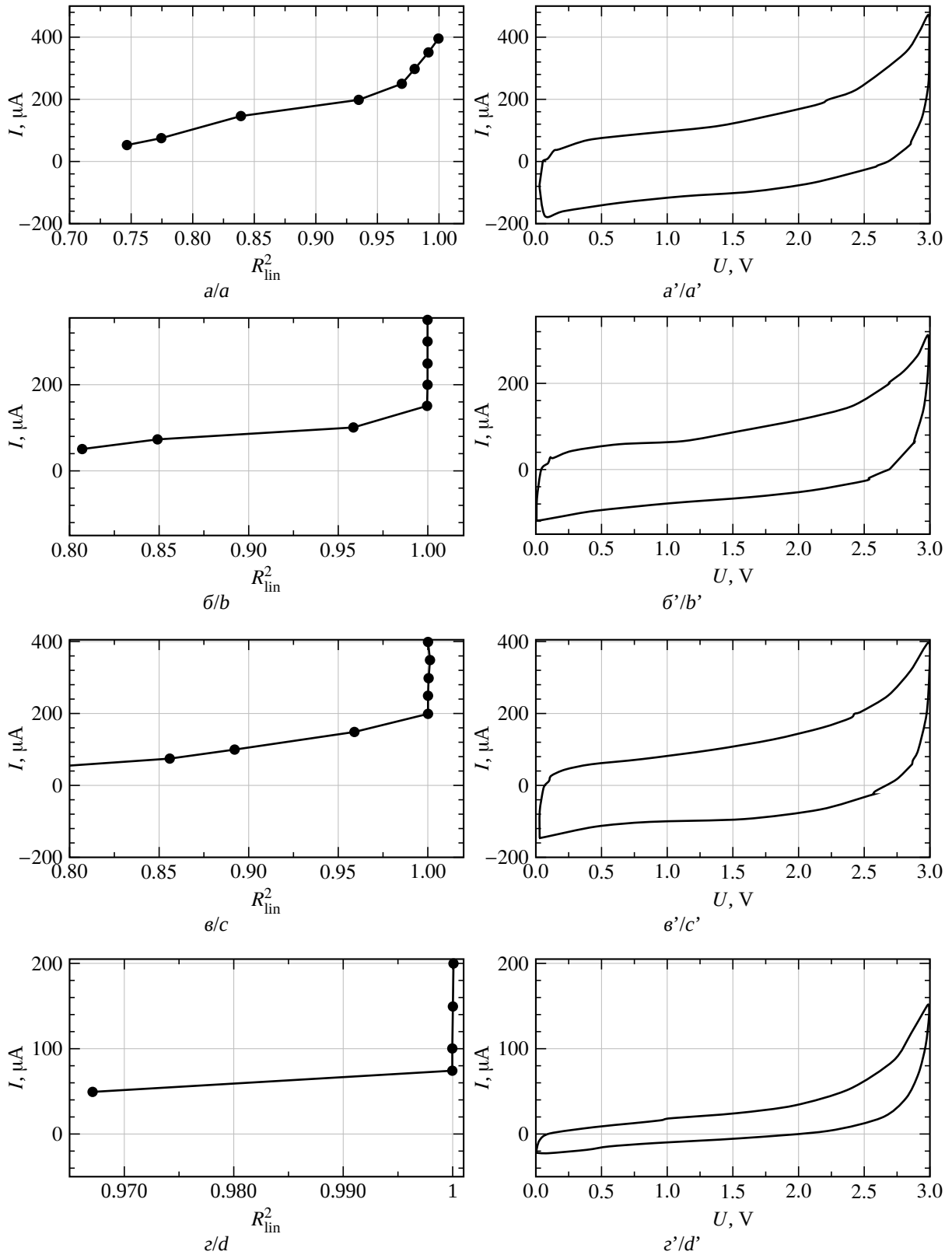


Рис. 5. Зависимости коэффициентов корреляции от тока заряда (а, б, в, з) и циклические вольтамперограммы при 5 мВ/с (а', б', в', з') СК ДЭС на основе СП4 (а, а'), СП7 (б, б'), СП11 (в, в'), МСМВ (з, з')

Fig. 5. Dependencies of the correlation coefficients on the charge current (a, b, c, d) and cyclic voltammograms at 5 mV/s (a', b', c', d') of EDLC based on SP4 (a, a'), SP7 (b, b'), SP11 (c, c'), MSMB (d, d')



ность, определяемую методом БЭТ, различен, а именно спектр распределения пористости будет определять динамику заряда СК ДЭС.

**Таблица 2 / Table 2**

Удельные емкостные характеристики исследуемых углеродных материалов при различных скоростях развертки, погрешность 5%

Specific capacitance characteristics of the studied carbon materials (F/g) at different sweep rates, error 5%

Скорость развертки, мВ/с		Удельная емкость, Ф/г			
		СП4	СП 7	СП 11	МСМВ
5	Полная	228	55	148	4
	Обратимая	162	42	93	2
50	Полная	139	35	84	1.77
	Обратимая	122	35	75	1.15

При анализе влияния состава УМ на зарядные характеристики становится понятно, что увеличение ТОМ при одинаковом содержании ПМ ведёт к увеличению ёмкости. Кроме того, с увеличением доли ПМ емкости существенно снижаются.

Соотнесение циклических вольтамперограмм каждого материала и зависимости коэффициентов корреляции от тока заряда (рис. 5) наглядно показывает, что линейный рост тока на циклических вольтамперных зависимостях наблюдается при тех же токовых нагрузках, что и существенный рост коэффициента корреляции линейной регрессии при гальваностатическом циклировании. Так, у материала СП4  $R_{lin}^2$  сильно увеличивается при токовой нагрузке 400 мкА, у СП11 – при 200 мкА, у СП7 – при 150 мкА, у МСМВ – при 75 мкА.

Заметно, что увеличение значений тока, при которых практически достигается линейность зарядных полуциклов, происходит у тех материалов, которые обладают большей емкостью.

Таким образом, подъем тока на циклических вольтамперограммах также может быть связан с неравномерностью распределения ДЭС по поверхности. Эта неравномерность возникает из-за сложной высокоразвитой поверхности углеродных материалов, практически полностью определяемой пористостью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены гальваностатические и хроновольтамперометрические исследования нанокompозитов на основе ТУ: СП4, СП7, СП11.

Рассчитаны их емкостные характеристики. Наибольшую полную удельную емкость показал материал СП4, имеющий в своем составе самое большое количество термоокислительной модификации и низкое содержание пироуглеродной матрицы, а также обладающий самой высокой удельной поверхностью. Полная емкость данного материала составила 228, обратимая – 162 Ф/г.

Проведенные исследования позволяют сделать важный для практики вывод: суперконденсаторы двойного электрического слоя, рассчитанные на работу в импульсном режиме, не смогут использовать в разряде часть поверхности, определяемую микропорами. Для таких применений целесообразно искать материалы, содержащие преимущественно макро- и мезопоры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Conway B. E. Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications. New York : Springer, 1999. 698 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>
2. Мальцев А. А. Поверхностно модифицированные, мезопористые и наноструктурированные углеродные материалы для электрохимических накопителей энергии : дис. ... канд. хим. наук / Институт биохимической физики имени Н. М. Эмануэля РАН. М., 2019. 134 с.

3. Xiao Li, Wei Xing, Shuping Zhuo, Jin Zhou, Feng Li, Shi-Zhang Qiao, Gao-Qing Lu. Preparation of capacitor's electrode from sunflower seed shell // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102. P. 1118–1123. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.110>
4. Yang K., Fan Q., Song C., Sun Y., Jiang W., Fu P. Enhanced functional properties of porous carbon materials as high-performance electrode materials for supercapacitors // Green Energy and Resources.

2023. Vol. 1. P. 3–4. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100030>

5. Youliang Cheng, Qingling Zhang, Changqing Fang, Jing Chen, Shaohua Guo, Xinchuan Che. Controllable morphologies and electrochemical properties of graphitizing MCMB-based hybrids with nanostructure via a simple chemical vapor deposition method // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 724. P. 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.324>

6. Esarev I., Agafonov D., Surovikin Y., Nesov S., Lavrenov A. On the causes of non-linearity of galvanostatic charge curves of electrical double layer capacitors // *Electrochimica Acta*. 2021. Vol. 390. Article number 138896. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138896>

7. Технологическое горение: коллективная монография / под редакцией С. М. Алдошина, М. И. Алымова. М. : ИПХФ РАН, 2018. 611 с.

8. Krause A., Kossyrev P., Oljaca M., Passerini S., Winter M., Balducci A. Electrochemical double layer capacitor and lithium-ion capacitor based on carbon black // *J. Power Sources*. 2011. Vol. 196. P. 8836–8842.

9. Шайтанов А. Г., Суровикин Ю. В., Сырьева А. В., Арбузов А. Б. Исследование изменений структуры частиц технического углерода после термогазохимической модификации методом колебательной спектроскопии // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6, № 2. С. 236–243. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2018-6-2-236-243>

#### REFERENCES

1. Conway B. E. *Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications*. New York, Springer, 1999. 698 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>

2. Maltsev A. A. *Surface modified, mesoporous and nanostructured carbon materials for electrochemical energy storage devices*. Diss. Cand. Sci. (Chem.). Moscow, 2019. 134 p. (in Russian).

3. Xiao Li, Wei Xing, Shuping Zhuo, Jin Zhou, Feng Li, Shi-Zhang Qiao, Gao-Qing Lu. Preparation of capacitor's electrode from sunflower seed shell. *Bioresour. Technology*, 2011, vol. 102, pp. 1118–1123. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.110>

4. Yang K., Fan Q., Song C., Sun Y., Jiang W., Fu P. Enhanced functional properties of porous carbon materials as high-performance electrode materials for supercapacitors. *Green Energy and Resources*, 2023, vol. 1, pp. 3–4. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100030>

5. Youliang Cheng, Qingling Zhang, Changqing Fang, Jing Chen, Shaohua Guo, Xinchuan Che. Controllable morphologies and electrochemical properties of graphitizing MCMB-based hybrids with nanostructure via a simple chemical vapor deposition method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017,

vol. 724, pp. 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.324>

6. Esarev I., Agafonov D., Surovikin Y., Nesov S., Lavrenov A. On the causes of non-linearity of galvanostatic charge curves of electrical double layer capacitors. *Electrochimica Acta*, 2021, vol. 390, article no. 138896. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138896>

7. *Tekhnologicheskoe gorenije: kollektivnaya monografiya. Pod redaktsiei S. M. Aldoshina, M. I. Alymova* [Aldoshin S. M., Alymova M. I., eds. Technological combustion: collective monograph]. Moscow, IPCP RAS, 2018. 611 p. (in Russian).

8. Krause A., Kossyrev P., Oljaca M., Passerini S., Winter M., Balducci A. Electrochemical double layer capacitor and lithium-ion capacitor based on carbon black. *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, pp. 8836–8842.

9. Shaytanov A. G., Surovikin Yu. V., Syryeva A. V., Arbuzov A. B. Study of changes in the structure of carbon black particles after thermogas-chemical modification using vibrational spectroscopy. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 236–243 (in Russian). <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2018-6-2-236-243>

Поступила в редакцию 07.11.2023; одобрена после рецензирования 21.11.2023; принята к публикации 04.12.2023  
The article was submitted 07.11.2023; approved after reviewing 21.11.2023; accepted for publication 04.12.2023