

УДК 541.135

**СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОРИСТЫХ СВИНЦОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ С ДОБАВКОЙ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА**

**В. О. Данилова¹, М. М. Бурашникова¹✉, Т. С. Храмова¹, С. Д. Гриценко¹, К. А. Самсонова¹,
С. А. Жданок², И. А. Казаринов¹**

¹ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»
410012, Россия, Саратов, Астраханская, 83

²ООО «Перспективные исследования и технологии»
223058, Республика Беларусь, Минская область, Минский район, д. Лесковка, Совхозная, 1

✉ E-mail: burashnikova_mm@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.04.2019 / Принята: 30.05.2019 / Опубликовано онлайн: 24.06.2019

Изучено влияние углеродных материалов двух типов – многостенных углеродных нанотрубок («Арт-нано» марки НСУ «С» (ТУ БУ 690654933.001.-2011)) и многослойного графена («Арт-нано GT» (ТУ БУ 691460594.004–2017)) – и их модификаций путем обработки озоном и диметилформамидом (производитель ООО «Перспективные исследования и технологии, Республика Беларусь») на структурные характеристики, ёмкость и коэффициент использования активной массы отрицательного электрода свинцово-кислотного аккумулятора. Получено, что наиболее высокие коэффициенты использования активной массы наблюдаются при использовании углеродных материалов «Арт-нано» марки НСУ «С» и «Арт-нано GT», обработанных диметилформамидом. Введение углеродных добавок оказывает влияние на пористую структуру электродов: повышается доля мелких пор, общая пористость и удельная поверхность электродов.

Ключевые слова: свинцово-кислотный аккумулятор, отрицательная активная масса, углеродная добавка, разрядная ёмкость, пористая структура.

**Structural and Electrochemical Characteristics of Porous Lead Electrodes with Additive
Nanostructured Carbon**

Veronika O. Danilova¹, <https://orcid.org/0000-0001-8431-9753>, danilowa.veronicka@yandex.ru

Marina M. Burashnikova¹✉, <https://orcid.org/0000-0003-23245273>, burashnikova_mm@mail.ru

Tat'yana S. Khramkova¹, <https://orcid.org/0000-0002-2624-0622>, tanaden1986@mail.ru

Stanislav D. Gritsenko¹, <https://orcid.org/0000-0001-6955-8190>, stas-gricenko@mail.ru

Kseniya A. Samsonova¹, <https://orcid.org/0000-0002-0010-0357>, kseniasamsonova18935@gmail.com

Siarhei A. Zhdanok², ceo@art-pte.com

Kazarinov I. Alekseevich¹, <https://orcid.org/0000-0002-4858-9614>, KazarinovIA@mail.ru

¹Saratov State University

83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²“Advanced Research & Technologies” LLC

1 Sovhoznaya St., D. Leskovka, Minsk Region, Minsk District, 223058, Belarus

Received: 15.04.2019 / Accepted: 30.05.2019 / Published online: 24.06.2019

The effect of carbon materials of two types was studied: multi-walled carbon nanotubes (“Art-nano” of the NSU “S” brand (TU BU 690654933.001.-2011)) and multilayer graphene (“Art-nano GT” (TU BU 691460594.004–2017)), and modifications by treatment with ozone and dimethylformamide (manufacturer LLC Advanced Research and Technology, Belarus) on the structural characteristics, capacity and utilization of the active mass of the negative electrode of a lead-acid battery. It was found that the highest utilization of the active mass are observed using carbon materials “Art nano” NSU “C” and “Art nano-GT”, treated with dimethylformamide. The introduction of carbon additives has an effect on the porous structure of the electrodes: the proportion of small pores, the total porosity and the specific surface of the electrodes increase.

Keywords: lead-acid battery, negative active mass, carbon additive, discharge capacity, porous structure.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-105-115>

ВВЕДЕНИЕ

Введение углеродных добавок в активную массу отрицательного электрода свинцово-кислотного аккумулятора существенно задерживает сульфатацию отрицательных пластин во время теста, который моделирует высокоскоростное частично заряженное состояние (HRPSoC) аккумуляторов для гибридных транспортных средств. Приведем возможные механизмы действия углерода на процессы в отрицательных электродах свинцово-кислотных аккумуляторов, работающих в условиях HRPSoC. Мозли с соавторами [1] суммировали гипотезы, предложенные в литературе относительно действия углерода в условиях HRPSoC батарей, следующим образом:

- углерод увеличивает полную проводимость отрицательной активной массы [2, 3];
- углерод облегчает формирование небольших изолированных частиц $PbSO_4$, которые легко растворяются, и ограничивает рост кристаллов $PbSO_4$ [4];
- некоторые углеродные формы содержат примеси, которые препятствуют реакции выделения водорода и, следовательно, улучшают эффективность заряда [5, 6];
- углерод действует как электроосмотический насос, который облегчает диффузию кислоты в объем отрицательной активной массы (ОАМ) при высоких скоростях заряда и разряда [1];
- частицы сажи с высокой площадью поверхности имеют эффект суперконденсатора в ОАМ [7].

Всесторонний обзор влияния широкого спектра углеродных материалов, введенных как добавки в ОАМ, на циклирование в условиях HRPSoC предоставлен в ссылках [8, 9]. Важность влияния добавок углерода на структуру отрицательного электрода отмечается в работе [10].

Несмотря на большое число исследований, посвященных изучению влияния различных форм углерода на циклируемость и ёмкостные характеристики отрицательных свинцовых электродов, влияние углеродных

добавок на их пористую структуру изучено недостаточно.

Данная работа посвящена изучению взаимосвязи между структурными и электрохимическими свойствами отрицательного электрода свинцово-кислотного аккумулятора.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили пористые отрицательные свинцовые электроды с добавками углерода в количестве 0,5, 1,0, 1,5 мас.% по отношению к свинцовому порошку. Методика изготовления электродов описана в [11].

В качестве углеродных добавок в отрицательную пасту использовались следующие материалы.

Вариант 1. Углерод наноструктурированный технический активированный «Арт-нано» марки НСУ «С» (ТУ БУ 690654933.001.-2011) («НСУ»).

Вариант 2. Углерод наноструктурированный технический активированный «Арт-нано» марки НСУ «С» (ТУ БУ 690654933.001.-2011), обработанный в течение одного часа в потоке озона, получаемого с использованием стандартного озонатора («НСУ- O_3 »).

Вариант 3. Углерод наноструктурированный технический активированный «Арт-нано» марки НСУ «С» (ТУ БУ 690654933.001.-2011), обработанный в парах диметилформамида ДМФА, полученных при испарении и полном поглощении 2 мл ДМФА в объеме, содержащем 100 грамм углерода («НСУ-ДМФА»).

Вариант 4. Углерод технический расширенный «Арт-нано ГТ» (ТУ ВУ 691460594.004-2017), полученный методом низкотемпературного расширения («ГТ»).

Вариант 5. Углерод технический расширенный «Арт-нано ГТ» (ТУ ВУ 691460594.004-2017), обработанный в течение одного часа в потоке озона, получаемого с использованием стандартного озонатора («ГТ- O_3 »).

Вариант 6. Углерод технический расширенный «Арт-нано ГТ» (ТУ ВУ 691460594.004-2017), обработанный в парах ДМФА,

полученных при испарении и полном поглощении 3 мл ДМФА в объеме, содержащем 100 грамм углерода («ГТ-ДМФА»).

Тестирование исследуемых электродов проводилось в свинцово-кислотных ячейках с одним отрицательным и двумя положительными электродами, разделенных между собой абсорбтивно-стеклянными матричными сепараторами (Hollingsworth and Vose, США). Электролитом служил раствор серной кислоты ($d = 1.28 \text{ г·см}^{-3}$). Циклирование ячеек проводилось гальваностатическим способом. Первый заряд проводился трехступенчатым гальваностатическим режимом (1-я ступень – током 200 мА, 2-я ступень – током 100 мА, 3-я ступень – током 20 мА). Далее циклирование тестовых ячеек проводилось в следующем режиме: разряд током 100 мА до напряжения 1.7 В, заряд током 100 мА на 120% от ёмкости разряда.

Изучение морфологии поверхности исследуемых отрицательных электродов и углеродных материалов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCAEnergy (Tescan, Чехия). Разрешаю-

щая способность микроскопа достигает 5 нм, а чувствительность детектора INCAEnergy – 133 эВ/10 мм^2 . Исследования проводились в режиме высокого вакуума.

Для исследования пористой структуры электродов использовался метод контактной эталонной порометрии (КЭП) в испарительном варианте [12].

Для определения гранулометрического состава порошков использовался лазерный дифракционный анализатор размера частиц SALD-2201 (SHIMADZU, Япония).

Для измерения удельной поверхности твердых материалов применялся метод Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ). Изотермы адсорбции снимались на быстродействующем анализаторе сорбции газов QuantachromeNOVA (Quantachrome, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеризация углеродных материалов

На рис. 1 и рис. 2 представлены СЭМ-изображения морфологии поверхности исследуемых углеродных материалов. Как видно из рис. 1, исходный образец «Арт-нано» НСУ «С», а также образец, обрабо-

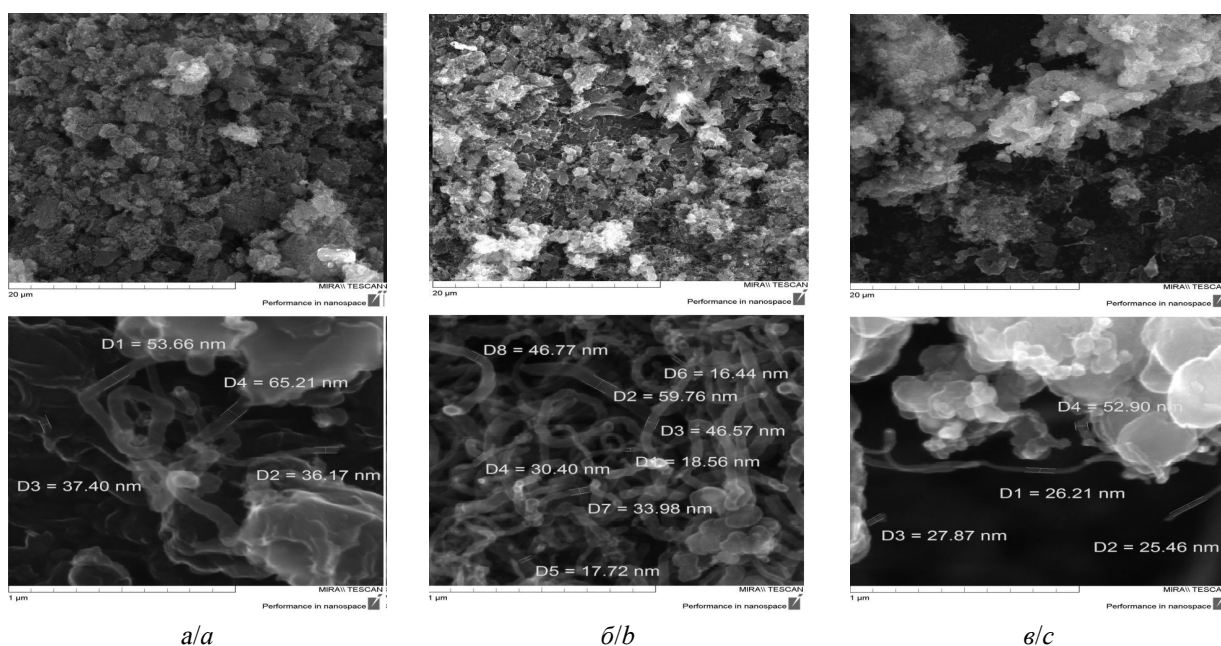


Рис. 1. СЭМ-изображения морфологии поверхности образцов «НСУ» (а), «НСУ-О₃» (б), «НСУ-ДМФА» (в)
 Fig. 1. SEM-images of the morphology of the surface of the samples “NSU” (a), “NSU-O₃” (b), “NSU-DMF” (c)

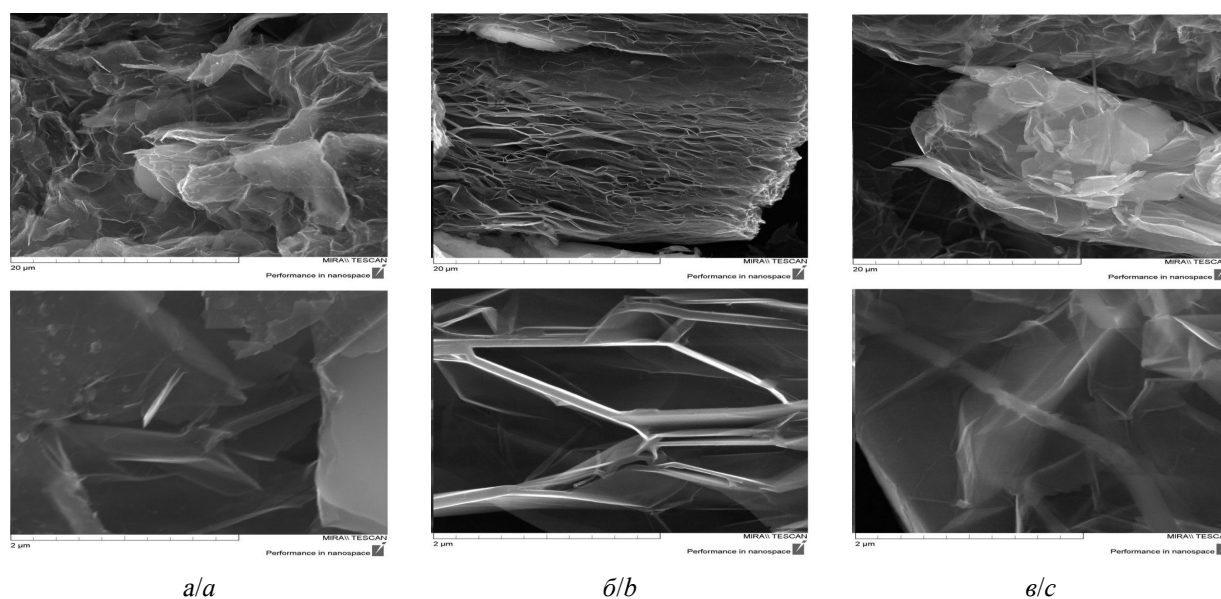


Рис. 2. СЭМ-изображения морфологии поверхности образцов «ГТ» (а), «ГТ-О₃» (б), «ГТ-ДМФА» (в)

Fig. 2. SEM-images of the surface morphology of the samples “GT” (a), “GT-O₃” (b), “GT-DMF” (c)

таный озон и ДМФА, представляют собой многослойные нанотрубки с диаметром от 16 до 65 нм. Образцы «Арт-нано ГТ», как исходные, так и обработанные озон и ДМФА, – многослойный графен с толщиной слоя 20–30 нм.

Кривые распределения частиц по размерам порошков в сухом виде наноструктурированного углерода «Арт-нано» НСУ «С», «Арт-нано» НСУ «С» (обработка озон) и «Арт-нано» НСУ «С» (обработка ДМФА) представлены на рис. 3. Образец «Арт-нано» НСУ «С» – наиболее мелкодисперсный и характеризуется размером частиц в диапазоне 5–10 мкм. Из представленных результатов видно, что обработка углеродного материала «Арт-нано» НСУ «С» озон и ДМФА привела к агломерации частиц, их размер варьируется в пределах от 5 до 150 мкм и от 5 до 300 мкм для «Арт-нано» НСУ «С» (обработка ДМФА) и «Арт-нано» НСУ «С» (обработка озон) соответственно.

На рис. 4 представлены кривые распределения частиц по размерам водной суспензии порошков «Арт-нано ГТ», «Арт-нано ГТ» (обработка озон), «Арт-нано ГТ» (обработка ДМФА). Эти углеродные добавки характеризуются крупным размером ча-

стиц, и их основная доля приходится на размеры от 30 до 300 мкм, для образца «Арт-нано ГТ» (обработка озон) наблюдаются частицы с размером 1000 мкм.

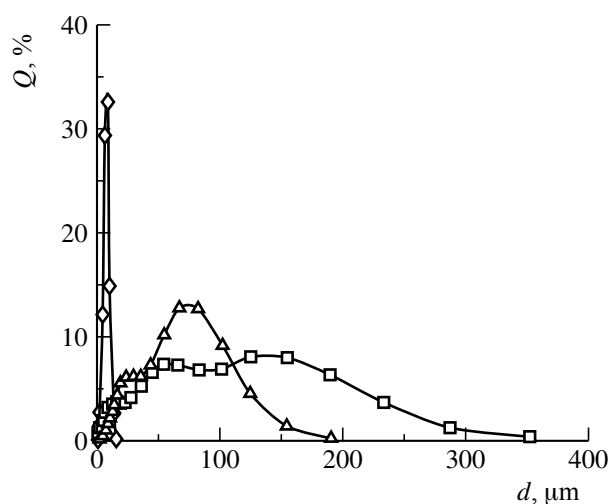


Рис. 3. Кривые распределения частиц по размерам углеродных материалов в сухом виде «НСУ» (◇), «НСУ-О₃» (□), «НСУ-ДМФА» (Δ)

Fig. 3. Curves of the distribution of particle size of carbon materials in a dry form “NSU” (◇), “NSU-O₃” (□), “NSU-DMF” (Δ)

Все данные по гранулометрическому составу углеродных материалов, полученные

как для сухих порошков, так и для водной суспензии, сведены в табл. 1.

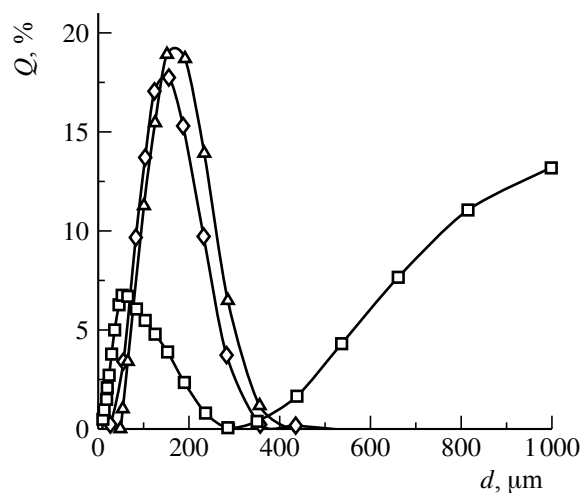


Рис. 4. Кривые распределения частиц по размерам углеродных материалов в водной суспензии «ГТ» (◇), «ГТ-О₃» (□), «ГТ-ДМФА» (Δ)

Fig. 4. Curves of particle size distribution of carbon materials in water suspension “GT” (◇), “GT-O₃” (□), “GT-DMF” (Δ)

Величины удельной поверхности углеродных материалов «Арт-нано» НСУ «С» и «Арт-нано ГТ», определенные методом БЭТ, составляют 65 и 32 м²·г⁻¹ соответственно.

Электрохимические характеристики отрицательных электродов с углеродными добавками

Данные по коэффициенту использования активной массы отрицательных электродов с углеродными добавками в количестве 1.0 мас.% в процессе циклирования представлены на рис. 5.

Из представленных данных видно, что все исследуемые углеродные добавки в количестве 1.0 мас.% повышают ёмкостные характеристики и коэффициент использования активной массы отрицательного электрода. Наилучшие характеристики показали электроды с добавкой «Арт-нано» НСУ «С» и «Арт-нано ГТ» (обработка ДМФА). Необходимо отметить, что образец «Арт-нано» НСУ имеет наиболее мелкодисперсную структуру как в сухом порошке, так и в водной суспензии. Образец ГТ (обработка ДМФА) имеет наиболее мелкодисперсную структуру в водной суспензии. К пятому циклу коэффициент использования активной массы для электродов с этими добавками остается на уровне 63%, тогда как для контрольного варианта эта величина снизилась до 47%.

Таблица 1 / Table 1

Гранулометрический состав исследуемых углеродных материалов
Granulometric composition of the carbon materials

Углеродная добавка	Сухой порошок		Водная суспензия	
	Диапазон размеров частиц d , мкм	Диапазон максимума размеров частиц d , мкм	Диапазон размеров частиц d , мкм	Диапазон максимума размеров частиц d , мкм
«Арт-нано» НСУ «С»	3–12	6–10	10–300	30–150
«Арт-нано» НСУ «С» (обработка озоном)	5–300	40–80, 120–200	20–700	100–500
«Арт-нано» НСУ «С» (обработка ДМФА)	5–150	50–100	20–700	100–500
«Арт-нано ГТ»	–	–	40–300	100–200
«Арт-нано ГТ» (обработка озоном)	–	–	30–1000	35–150, 700–1000
«Арт-нано ГТ» (обработка ДМФА)	250–650	350–500	50–300	100–250

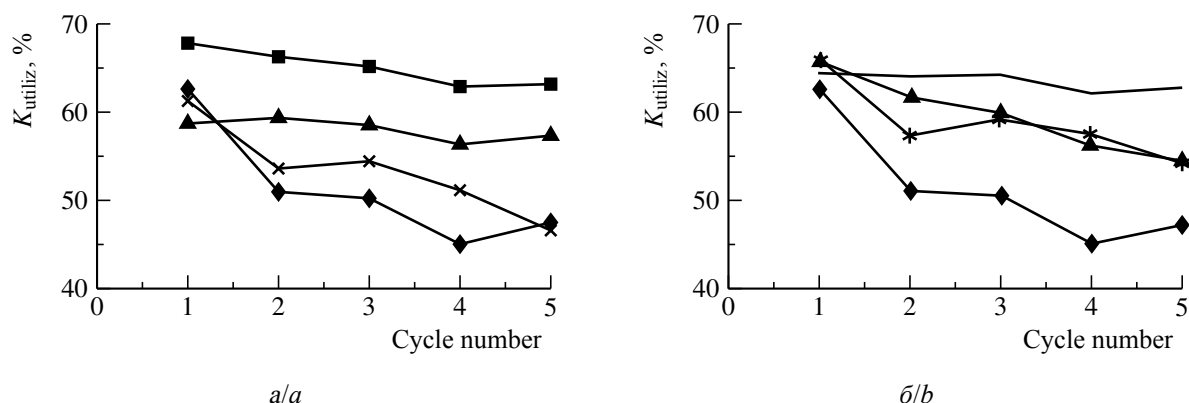


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования ($K_{\text{исп}}$) активной массы отрицательных электродов с содержанием углеродных добавок 1.0 мас.% от номера цикла. Ток разряда $I_{\text{разр}} = 100$ мА, общая площадь электрода с двух сторон $S_{\text{эл}} = 19.7 \pm 0.5$: а – контрольный вариант (♦), «НСУ» (■), «НСУ-О₃» (▲), «НСУ-ДМФА» (×); б) – контрольный вариант (♦), «ГТ» (*), «ГТ-О₃» (●), «ГТ-ДМФА» (—)

Fig. 5. The dependence of the utilization ratio (K_{utiliz}) of the active mass of negative electrodes with a content of carbon additives of 1.0 wt.% of the cycle number. The discharge current $I = 100$ mA, the total area of the electrode on both sides is $S = 19.7 \pm 0.5$ centimeter square: a – the control variant (♦), “NSU” (■), “NSU-O₃” (▲), “NSU-DMF” (×); b – control variant (♦), “GT” (*), “GT-O₃” (●), “GT-DMF” (—)

Влияние концентрации углеродных добавок на коэффициент использования активной массы представлено на рис. 6. Для углеродных добавок «Арт-нано» НСУ «С», «Арт-нано» НСУ «С» (обработка озонем), «Арт-нано» ГТ (обработка ДМФА) наиболее оптимальной концентрацией является 1.0 мас.%, а для «Арт-нано» НСУ «С» (обработка ДМФА), «Арт-нано» ГТ, «Арт-нано»

ГТ (обработка озонем) наблюдается небольшое повышение $K_{\text{исп}}$ при увеличении содержания добавок до 1.5 мас.%.

Структурные характеристики отрицательных электродов с углеродными добавками

Морфология поверхности отрицательных электродов с углеродными добавками

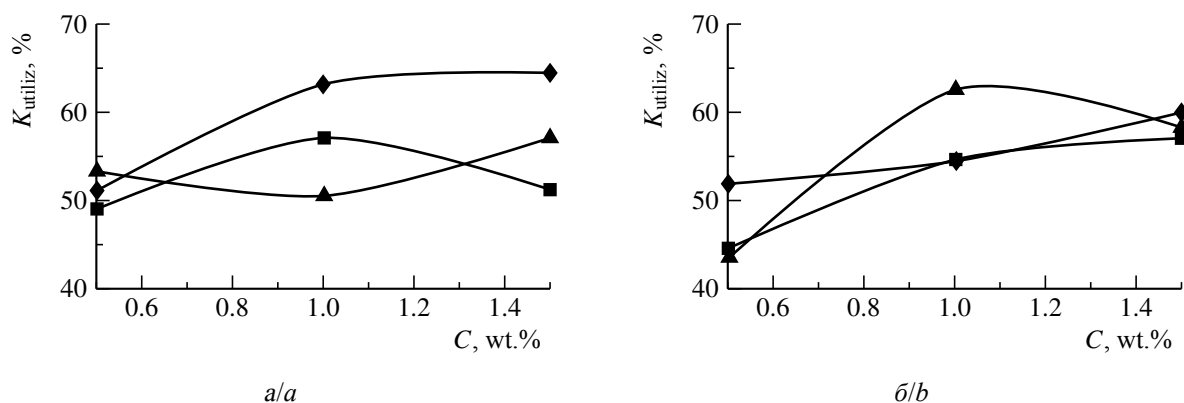


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования ($K_{\text{исп}}$) активной массы отрицательных электродов от концентрации углеродных добавок: а – «НСУ» (♦), «НСУ-О₃» (■), «НСУ-ДМФА» (▲); б – «ГТ» (♦), «ГТ-О₃» (■), «ГТ-ДМФА» (▲)

Fig. 6 The dependence of the utilization ratio (K_{utiliz}) of the active mass of negative electrodes on the concentration of carbon additives: a – “NSU” (♦), “NSU-O₃” (■), “NSU-DMF” (▲); b – “GT” (♦), “GT-O₃” (■), “GT-DMF” (▲)

с концентрацией 1.0 мас.% на 5-м цикле в заряженном состоянии представлена на рис. 7. На поверхности электродов контрольного варианта (без углеродных добавок) можно ви-

деть сфероидальные зерна свинца, а также кристаллы призматической структуры сульфата свинца. Образцы с углеродными добавками имеют округленные кристаллы более

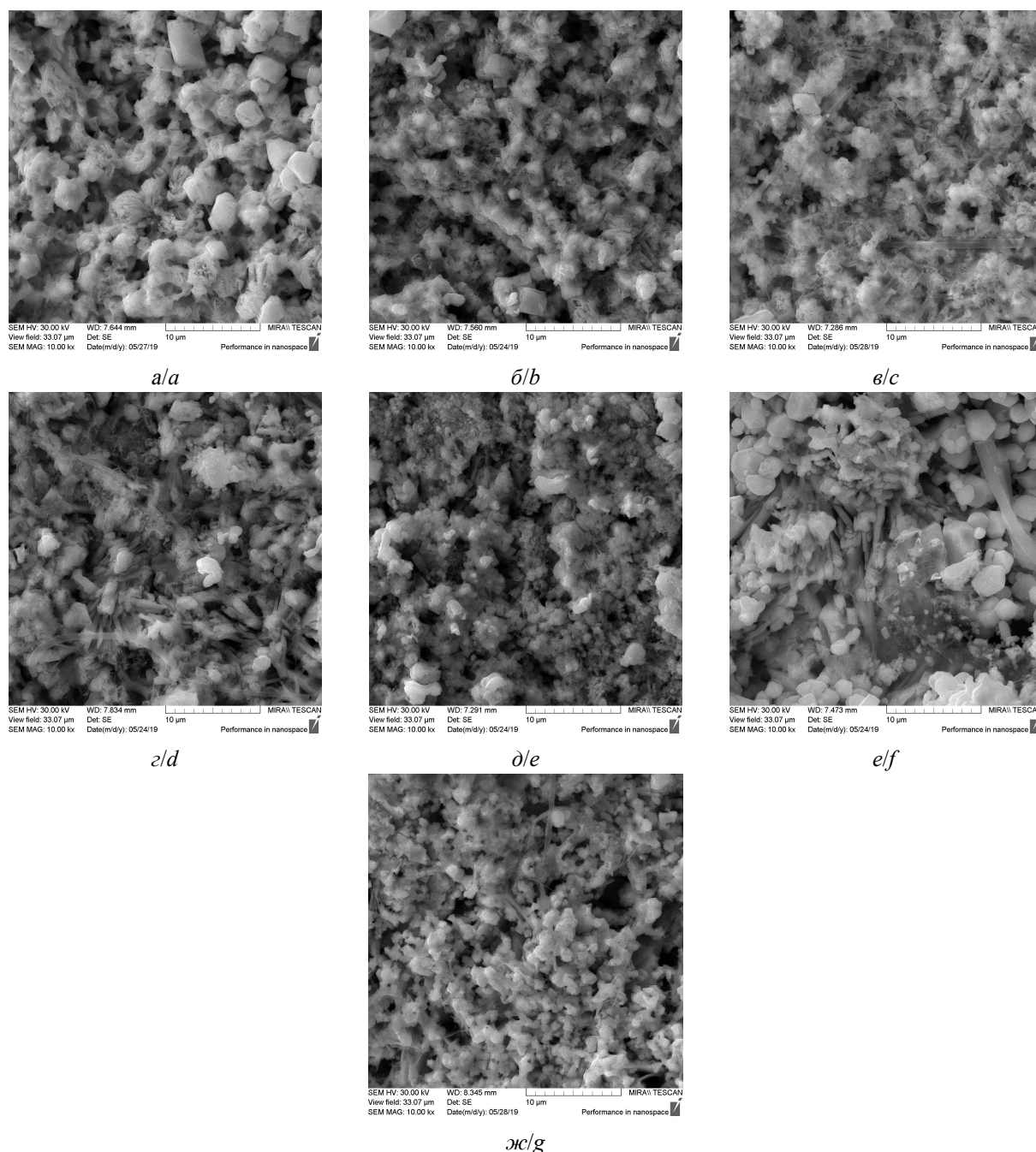


Рис. 7. СЭМ-изображения отрицательных электродов в заряженном состоянии на 5-м цикле с различными углеродными добавками (1.0 мас.%) в активной массе: *a* – контрольный вариант, *б* – «НСУ», *в* – «НСУ-О₃», *г* – «НСУ-ДМФА», *д* – «ГТ», *е* – «ГТ-О₃», *ж* – «ГТ-ДМФА»

Fig. 7. SEM images of negative electrodes in a charged state on the 5th cycle with various carbon additives (1.0 wt.%) In the active mass: *a* – control variant, *b* – “NSU”, *c* – “NSU-O₃”, *d* – “NSU-DMF”, *e* – “GT”, *f* – “GT-O₃”, *g* – “GT-DMF”

мелких размеров, структура более разветвленная, что связано с внедрением частиц углерода в объем активной массы. Так как частицы углерода электропроводны, электрохимическая реакция восстановления иона свинца может происходить на их поверхности. Вновь образованный свинец окружает углеродные зерна и таким образом включается в объем отрицательной активной массы.

Если углеродные частицы включаются в объем свинцового скелета, то они должны изменить макроструктуру отрицательной активной массы. Эта структура характеризуется прежде всего радиусом пор и удельной поверхностью. Распределение пор по радиусам и удельная поверхность электродов определялись методом КЭП, общая пористость – методом гидростатического взвешивания.

На рис. 8 представлены кривые зависимости влагосодержания от логарифма радиуса пор исследуемых свинцовых электродов, а в табл. 2 – распределение пор по радиусам, удельная поверхность и общая пористость.

Видно, что при введение углеродных добавок происходит перераспределение пор по радиусам: увеличивается доля пор с радиусом меньше 0.1 мкм и уменьшается доля

пор в диапазоне 0.1–1.0 мкм. Также наблюдается увеличение общей пористости и удельной поверхности электродов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были охарактеризованы образцы углеродных материалов, полученные в ООО «Перспективные исследования и технологии» (г. Минск, Республика Беларусь). Показано, что все исследуемые образцы углеродных материалов являются полидисперсными и имеют микрометровые размеры. Наиболее мелкодисперсным является углеродный материал «Арт-нано» НСУ «С» (3–12 мкм). Показано, что в присутствии исследуемых углеродных добавок происходит изменение пористой структуры заряженных свинцовых электродов. Увеличивается доля мелких пор с радиусом менее 0.1 мкм, соответственно уменьшается доля пор с размерами в диапазоне 0.1–1.0 мкм. Введение углеродных добавок приводит также к увеличению общей пористости электродов более чем на 10%. Изменение пористой структуры приводит к увеличению удельной поверхности электродов.

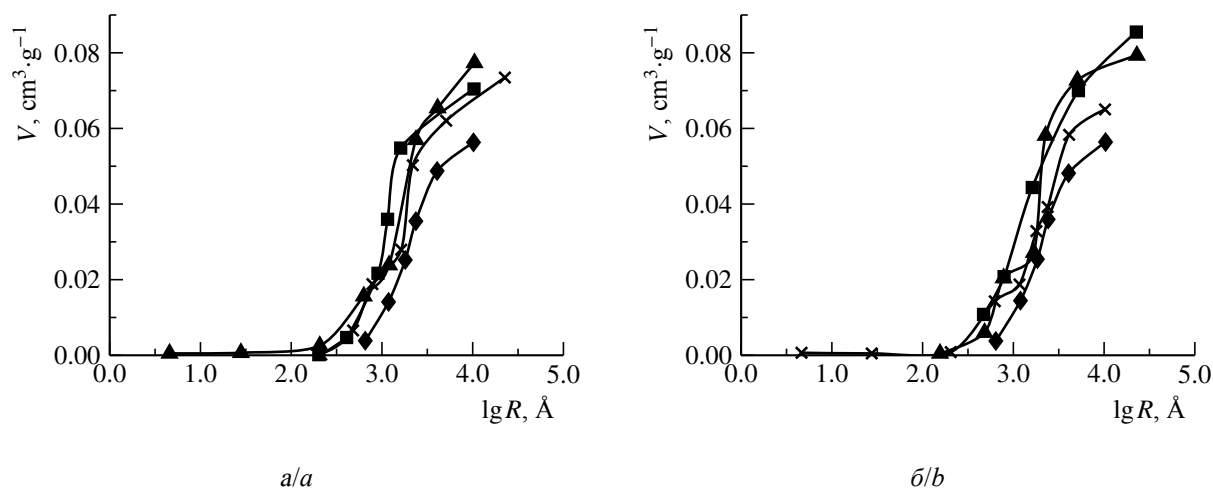


Рис. 8. Кривые зависимости влагосодержания от радиуса пор свинцовых электродов в заряженном состоянии на 5-м цикле с различными углеродными добавками: *a* – контрольный вариант (♦), «НСУ» (■), «НСУ-О₃» (▲), «НСУ-ДМФА» (×); *b* – контрольный вариант (♦), «ГТ» (■), «ГТ-О₃» (▲), «ГТ-ДМФА» (×)

Fig. 8. Curves of moisture content on the pore radius of lead electrodes in a charged state on the 5th cycle with various carbon additives: *a* – control variant (♦), “NSU” (■), “NSU-O₃” (▲), “NSU-DMF” (×); *b* – control variant (♦), “GT” (■), “GT-O₃” (▲), “GT-DMF” (×)

Таблица 2 / Table 2

Структурные характеристики отрицательных электродов в заряженном состоянии (6-й заряд). Содержание углеродной добавки 1 мас.%

Structural characteristics of the negative electrodes in the charged state (6 charge). The content of the carbon additive 1 wt.%

Вариант электрода	Радиус пор, мкм			Удельная поверхность электрода $S_{уд}, м^2 \cdot г^{-1}$	Общая пористость электрода,
	Менее 0.1	0.1–1	1–10		
	Относительный объем пор, %				
Контрольный вариант	7.39	78.75	13.86	0.61	36.0
НСУ С	31.40	46.84	21.76	1.58	43.3
НСУ С (O ₃)	21.14	63.25	15.61	2.87	46.4
НСУ С (ДМФА)	12.70	60.80	26.50	0.79	36.0
Арт-нано ГТ	24.36	57.70	17.94	1.01	46.4
Арт-нано ГТ (O ₃)	26.56	65.09	8.35	1.55	43.3
Арт-нано ГТ (ДМФА)	22.05	66.93	11.02	2.58	44.5

Изучение разрядных характеристик свинцовых электродов в макетах СКА показало, что все исследуемые углеродные добавки повышают ёмкостные характеристики и коэффициент использования активной массы отрицательного электрода. Наилучшие характеристики показали электроды с добав-

кой углерода «Арт-нано» НСУ «С» и «Арт-нано» ГТ» (обработка ДМФА). К 5-му циклу коэффициент использования активной массы для электродов с этими добавками остается на уровне выше 60%, тогда как для контрольного варианта эта величина составляет менее 50%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moseley P. T., Nelson R. F., Hollenkamp A. F. The role of carbon in valve-regulated lead–acid battery technology Review Article // J. Power Sources. 2006. Vol. 157, iss. 1. P. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.031>

2. Nakamura K., Shiomi M., Takahashi K., Tsubota M. Failure modes of valve-regulated lead / acid batteries // J. Power Sources. 1996. Vol. 59, iss. 1–2. P. 153–157 DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(95\)02317-8](https://doi.org/10.1016/0378-7753(95)02317-8)

3. Hollekamp A. F., Baldsing W. G. A., Lau S., Lim O. V., Hewnham R. H., Rand D. A. J. et al. ALABC project NI.2, final report 2002. Advanced Lead-Acid Battery Consortium, Research Triangle Park, NC, USA, 2002.

4. Shiomi M., Funato T., Nakamura K., Takahashi K., Tsubota M. Effects of carbon in negative plates on cycle-life performance of valve-regulated lead-acid batteries // J. Power Sources. 1997. Vol. 64, iss. 1–2. P. 147–152. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(96\)02515-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)02515-3)

5. Moseley P. T. Consequences of including carbon in the negative plates of Valve-regulated Lead–Acid batteries exposed to high-rate partial-state-of-charge

operation // J. Power Sources. 2009. Vol. 191, iss. 1. P. 134–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.08.084>

6. Lam L. T., Phyland C. G., Rand D. A. J., Vella D. G., Vu L. H. ALABC project N3.1, final report 2002. Advanced Lead-Acid Battery Consortium, Research Triangle Park, NC, USA, 2002.

7. Fernández M., Valenciano J., Trinidad F., Muñoz N. The use of activated carbon and graphite for the development of lead-acid batteries for hybrid vehicle applications // J. Power Sources. 2010. Vol. 195, iss. 14. P. 4458–4469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.131>

8. Boden D. P., Loosemore D. V., Spence M. A., Wojcinski T. D. Optimization studies of carbon additives to negative active material for the purpose of extending the life of VRLA batteries in high-rate partial-state-of-charge operation // J. Power Sources. 2010. Vol. 195, iss. 14. P. 4470–4493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.069>

9. Moseley P. T., Rand D. A. J., Davidson A., Monahov B. Understanding the functions of carbon in the negative active-mass of the lead–acid battery : A review

of progress // *J. Energy Storage*. 2018. Vol. 19. P. 272–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.08.003>

10. Pavlov D., Nikolov P. Capacitive carbon and electrochemical lead electrode systems at the negative plates of lead acid batteries and elementary processes on cycling // *J. Power Sources*. 2013. Vol. 242. P. 380–399. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.065>

11. Данилова В. О., Бурашникова М. М., Гриценко С. Д., Самсонов М. А., Казаринов И. А. Влияние добавок углерода с различной структурой к актив-

ной массе отрицательной электрода свинцово-кислотного аккумулятора на его разрядные характеристики // *Электрохимическая энергетика*. 2016. Т. 16, № 1. С. 10–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.18500/1608-4039-2016-1-10-16>

12. Вольфович Ю. М., Багоцкий В. С., Сосенкин В. Е., Школьников Е. И. Методы эталонной порометрии и возможные области их применения в электрохимии // *Электрохимия*. 1980. Т. 16, вып. 8. С. 1620–1653.

REFERENCES

1. Moseley P. T., Nelson R. F., Hollenkamp A. F. The role of carbon in valve-regulated lead–acid battery technology Review Article. *J. Power Sources*, 2006, vol. 157, iss. 1, pp. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.031>

2. Nakamura K., Shiomi M., Takahashi K., Tsubota M. Failure modes of valve-regulated lead/acid batteries. *J. Power Sources*, 1996, vol. 59, iss. 1–2, pp. 153–157 DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(95\)02317-8](https://doi.org/10.1016/0378-7753(95)02317-8)

3. Hollekamp A. F., Baldsing W. G. A., Lau S., Lim O. V., Hewnham R. H., Rand D. A. J. et al. *ALABC project N1.2, final report 2002*. Advanced Lead-Acid Battery Consortium, Research Triangle Park, NC, USA, 2002.

4. Shiomi M., Funato T., Nakamura K., Takahashi K., Tsubota M. Effects of carbon in negative plates on cycle-life performance of valve-regulated lead-acid batteries. *J. Power Sources*, 1997, vol. 64, iss. 1–2, pp. 147–152. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(96\)02515-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)02515-3)

5. Moseley P. T. Consequences of including carbon in the negative plates of Valve-regulated Lead–Acid batteries exposed to high-rate partial-state-of-charge operation. *J. Power Sources*, 2009, vol. 191, iss. 1, pp. 134–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.08.084>

6. Lam L. T., Phylant C. G., Rand D. A. J., Vella D. G., Vu L. H. *ALABC project N3.1, final report 2002*. Advanced Lead-Acid Battery Consortium, Research Triangle Park, NC, USA, 2002.

7. Fernández M., Valenciano J., Trinidad F., Muñoz N. The use of activated carbon and graphite for

the development of lead-acid batteries for hybrid vehicle applications. *J. Power Sources*, 2010, vol. 195, iss. 14, pp. 4458–4469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.131>

8. Boden D. P., Loosemore D. V., Spence M. A., Wojcinski T. D. Optimization studies of carbon additives to negative active material for the purpose of extending the life of VRLA batteries in high-rate partial-state-of-charge operation. *J. Power Sources*, 2010, vol. 195, iss. 14, pp. 4470–4493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.069>

9. Moseley P. T., Rand D. A. J., Davidson A., Monahov B. Understanding the functions of carbon in the negative active-mass of the lead–acid battery: A review of progress. *J. Energy Storage*, 2018, vol. 19, pp. 272–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.08.003>

10. Pavlov D., Nikolov P. Capacitive carbon and electrochemical lead electrode systems at the negative plates of lead acid batteries and elementary processes on cycling. *J. Power Sources*, 2013, vol. 242, pp. 380–399. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.065>

11. Danilova V. O., Burashnikova M. M., Gricenko S. D., Samsonov M. A., Kazarinov I. A. Effect of carbon with different structure to the active mass of the negative electrode lead-acid batteries at its discharge characteristics. *Electrochemical Energetics*, 2016, vol. 16, no.1, pp. 10–16 (in Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.18500/1608-4039-2016-1-10-16>

12. Volfkovich Yu. M., Bagockij V. S., Sosenkin V. E., Shkolnikov E. I. Methods of standard porometry and possible areas of their application in electrochemistry. *Elektrokhimiya*, 1980, vol. 16, pp. 1620–1653 (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Данилова Вероника Олеговна – аспирантка, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: 8(452)51-64-13, e-mail: daniлова.veronica@yandex.ru

Бурашникова Марина Михайловна – доктор химических наук, доцент, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: 8(452)51-64-13, e-mail: burashnikova_mm@mail.ru

Храмкова Татьяна Сергеевна – кандидат химических наук, доцент, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: 8(452)51-64-13, e-mail: tanaden1986@mail.ru

Гриценко Станислав Дмитриевич – магистрант, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: 8(452)51-64-13, e-mail: stas-gricenko@mail.ru

Самсонова Ксения Александровна – студентка, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: 8(452)51-64-13, e-mail: kseniasamsonova18935@gmail.com

Жданок Сергей Александрович – главный научный сотрудник ООО «Перспективные исследования и технологии», д. Лесковка, Минский район, Минская область, Республика Беларусь. Служебный тел.: +375-33-310-43-27, e-mail: ceo@art-pte.com

Казаринов Иван Алексеевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физической химии, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: 8(452)51-64-13, e-mail: KazarinovIA@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Данилова В. О., Бурашникова М. М., Храмкова Т. С., Гриценко С. Д., Самсонова К. А., Жданок С. А., Казаринов И. А. Структурные и электрохимические характеристики пористых свинцовых электродов с добавкой наноструктурированного углерода // Электрохимическая энергетика. 2019. Т. 19, № 2. С. 105–115. DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-105-115>

For citation

Danilova V. O., Burashnikova M. M., Khramkov T. S., Gritsenko S. D., Samsonova K. A., Zhdanok S. A., Kazarinov I. A. Structural and Electrochemical Characteristics of Porous Lead Electrodes with Additive Nanostructured Carbon. *Electrochemical Energetics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp.105–115 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-105-115>