

УДК 541.135

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК УГЛЕРОДА С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ В АКТИВНУЮ МАССУ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА СВИНЦОВО-КИСЛОТНОГО АКУМУЛЯТОРА НА ЕГО РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В. О. Данилова, М. М. Бурашникова ✉, С. Д. Гриценко, М. А. Самсонов, И. А. Казаринов

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского  
410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83*

✉ E-mail: burashnikova\_mm@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.15 г.

Изучено влияние добавок графита «ГАК-2» (ГОСТ 10273-79), графита RFL-99.95 (Langheinrichstr.194051 Hauenberg) и углерода наноструктурированного НСУ «С» (ООО «Перспективные исследования и технологии») на ёмкость и коэффициент использования активной массы отрицательного электрода свинцово-кислотного аккумулятора. Получено, что введение 1 % углерода НСУ «С» приводит к увеличению разрядной ёмкости отрицательного электрода и увеличению коэффициента использования активной массы по сравнению с контрольным вариантом и вариантами с другими углеродными добавками.

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

DOI: 10.18500/1608-4039-2016-16-1-10-16

## EFFECT OF CARBON WITH DIFFERENT STRUCTURE TO THE ACTIVE MASS OF THE NEGATIVE ELECTRODE LEAD-ACID BATTERIES AT ITS DISCHARGE CHARACTERISTICS

V. O. Danilova, M. M. Burashnikova ✉, S. D. Gricenko, M. A. Samsonov, I. A. Kazarinov

*Saratov State University  
83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia*

✉ E-mail: burashnikova\_mm@mail.ru

Received 25.12.15

The influence of the graphite GAK-2 (GOST 10273-79), graphite RFL-99.95 (Langheinrichstr.194051 Hauenberg) and nano-technological activated carbon NSU «C» («Advanced Research and Technology») additives was investigated on the capacity and utilization of the active mass of the negative electrode lead-acid battery. It was found that the introduction of 1% carbon NSU «C» leads to an increase in the discharge capacity of the negative electrode, and an increase in the utilization of the active mass in comparison with the control variant and options with other carbon additives.

*Key words:* valve-regulated lead-acid battery, negative active material, carbon additive, discharge capacity.

DOI: 10.18500/1608-4039-2016-16-1-10-16

### ВВЕДЕНИЕ

К герметизированным свинцово-кислотным аккумуляторам (ГСКА), применяемым в гибридных автомобилях и для хранения энергии в возобновляемых источниках энергии, предъявляются высокие требования с точки зрения улучшения циклируемости и заряжаемости в условиях высокоскоростного частично заряженного состояния. При эксплуатации ГСКА в этом режиме происходит ускоренная потеря ёмкости, что связывают с накоплением сульфата свинца в отрицательной активной массе [1]. Было обнаружено, что добавка углерода снижает сульфатацию отрицательных пластин и значительно улучшает циклируемость и заряжаемость ГСКА [2–6]. Для применения в свинцово-кислотных аккумуляторах используют графиты, сажи и активированные угли. В то время как все они являются формами элемен-

тарного углерода, методы их изготовления, а также их свойства и характеристики совершенно различны [7, 8]. Графит представляет собой высококристаллическую непористую форму углерода с площадью поверхности, как правило, до 50 м<sup>2</sup>/г и размером частиц выше 5 мкм. Доступны различные формы графита на основе различных методов производства: натуральные, синтетические, расширенные и т. д. Высокая степень кристалличности обычно достигается путём высокотемпературной обработки при 2500–3000°C, что приводит к низкой площади поверхности. Для электрохимических применений графиты часто дополнительно очищают, чтобы минимизировать уровни металлических примесей [5, 7]. Сажи представляют собой аморфные углеродные материалы с уникальной иерархической структурой, полученные при разложении углеводородного сырья (нефти, природного газа, каменноугольной смолы,

ацетилен) при высокой температуре (1000–1500°C). Их площадь поверхности варьируется в широком диапазоне от 20–1500 м<sup>2</sup>/г и размер частиц, как правило, в диапазоне от 50 до 300 нм. Сажа состоит из очень маленьких первичных частиц (10–80 нм), которые собираются в агрегаты 50–300 нм. В зависимости от среднего числа первичных частиц в агрегатах сажа может иметь низкую структуру (несколько первичных частиц в агрегате) или высокую структуру (много первичных частиц в агрегате). В процессе производства агрегаты сажи образуют несвязанные агломераты микронных размеров, которые могут рассеиваться. Активированные угли – аморфные, высокопористые угли с площадью поверхности 500–2000 м<sup>2</sup>/г и размером частиц выше, чем 2 мкм. Они производятся либо термически, либо процессом химической активации с помощью пара или химического травления при 400–900°C. Окончательный размер частиц достигается обычно путём измельчения более крупных агломератов, сформированных в процессе производства.

Влияние углерода на отрицательную пластину аккумулятора зависит от количества и типа углерода, от его активации, площади поверхности и пористости, чистоты, а также от содержания расширителя и сульфата бария [9]. Некоторые типы углерода могут улучшать работу отрицательной пластины, тогда как другие будут «отравлять». Это различие объясняется различными механизмами [10], ни один из которых не может точно предложить универсальную модель действия углерода.

Добавка углерода может влиять на следующие характеристики отрицательной активной массы.

*Электропроводность каркасной структуры свинца в отрицательной активной массе.* Углерод, даже графит и расширенный графит, имеют более низкую проводимость, чем свинец. Встроенные в скелетную ветвь частицы углерода, они будут частично понижать омическую проводимость.

*Электропроводность активной массы.* Частично заряженная отрицательная активная масса (ОАМ) содержит проводящие кристаллы свинца и непроводящие кристаллы сульфата свинца. Если частицы углерода находятся в хорошем омическом контакте с частицами ОАМ (кристаллы свинца или сульфата свинца), то может образоваться проводящий твёрдый мостик между ними. В результате местные градиенты потенциала уменьшаются, электропроводность увеличивается (особенно в частично или полностью заряженной отрицательной активной массе) и омическая поляризация ОАМ при высоких токах заряда также уменьшается.

*Ёмкость ДЭС.* Частицы углерода, прилипающие к кристаллам свинца, имеют свою высокую площадь поверхности. Если они проводящие и находятся в хорошем контакте с проводящей структурой свинца, то частицы углерода могут выступать как локальные микроэлектроды, формирующие «динамичный» суперконденсатор в отрицательной пластине. В зависимости от размера частиц углерода и свойств поверхности их добавочная ёмкость может по степени важности быть выше, чем ёмкость ОАМ. Таким образом, сформированная ёмкостная прокладка может заряжаться быстрее, чем частично сульфатированная отрицательная пластина.

*Импеданс отрицательной пластины.* Углеродные электроды имеют другой импеданс, чем свинец. Это зависит от типа углерода, структуры и параметров производства. Импеданс Pb-C массы отличен от импеданса свободной от углерода ОАМ.

*Удельная адсорбция молекул расширителя и морфология ОАМ.* Адсорбированные на поверхности углерода ионы могут локально изменять растворение, осаждение и условия для роста кристаллов свинца и сульфата свинца [9]. Подобно расширителям органические молекулы, сформированные на поверхности частиц углерода в результате окисления рекомбинированного кислорода и выделенные в электролит, могут влиять на кристаллизацию сульфата свинца и свинца. Образование органических соединений в результате электрохимического окисления графитовых электродов в растворе серной кислоты наблюдалось ранее [11]. Химия поверхности углерода может повлиять на молекулы расширителя и видоизменять их действие.

*Смачивание ОАМ и удержание электролита в отрицательной пластине.* Многие углеродные добавки плохо смачиваются водными растворами. Их поверхность может оставаться сухой в течение некоторого времени, несмотря на то, что пластина пропитана электролитом. Частицы углерода в ОАМ окружены отлично смачивающимися кристаллами свинца и сульфата свинца (или другими частицами углерода). В результате не все части смеси ОАМ+С будут полностью смочены. Пузырьки газа могут формироваться в некоторых порах и остаются там, уменьшая в этом случае количество электролита вокруг частицы углерода. Однако если поверхность углерода полностью смочена электролитом, то добавка углерода может сильно улучшить диффузию электролита в основную массу пластины. В этом случае локальное использование ОАМ может быть улучшено, особенно при состоянии неполного заряда и при высоких скоростях разряда. Другая возможность улучшить рабочие характеристики – это электроосмотическое на-

качивание электролита в поры отрицательной активной массы с добавками углерода.

*Рекомбинация кислорода.* Скорость рекомбинации кислорода в отрицательной пластине контролируется диффузией газа через тонкую плёнку электролита, сформированную под давлением газа на поверхности кристаллов свинца. Добавки углерода с различным углом смачивания могут существенно изменять свойства плёнки электролита. Кроме того, поверхность углерода может химически реагировать с кислородом. Все это может влиять на скорость рекомбинации кислорода.

*Выделение водорода.* Основной проблемой использования добавок углерода в ОАМ является то, что углерод может увеличивать скорость выделения водорода. Перенапряжение водорода на углеродном электроде и на свинце различается, также различаются начальные потенциалы. Выделение водорода на углероде не так хорошо изучено, как на свинце и других металлах. Частицы углерода имеют различное содержание металлических примесей, некоторые из которых, как известно, значительно понижают перенапряжение водорода. Углерод имеет высокое сродство к водороду. Вероятно, что водород может внедряться в графит [10].

Таким образом, для дальнейшего повышения характеристик ГСКА, работающих в условиях частично заряженного состояния, необходимо исследование различных характеристик углерода (площадь поверхности, пористость, размер частиц, проводимость и т. д.) и их влияния на электрохимическое поведение отрицательного электрода.

Целью данной работы явилось изучение структурных характеристик графита RFL 99.5M, графита ГАК-2, углерода наноструктурированного технического активированного НСУ «С» и их влияния на разрядные характеристики отрицательного электрода свинцово-кислотного аккумулятора.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве углеродных добавок в отрицательную пасту свинцового электрода использовались графит «ГАК-2» (ГОСТ 10273–79), графит RFL-

99.95 (Langheinrichstr.194051 Hauzenberg) и углерод наноструктурированный НСУ «С» (ООО «Перспективные исследования и технологии» (Технические условия РБ: ТУ ВУ 690654933.001-2011)).

Объектами исследования являлись отрицательные электроды свинцово-кислотного аккумулятора с различными добавками углерода. Для приготовления отрицательной активной массы при перемешивании в смеситель засыпали 25 г свинцового порошка, изготовленного из свинца марки «С1» (степень окисленности 67%), 0.5, 1.0, 1.5% исследуемой углеродной добавки по отношению к свинцовому порошку), 0.025 г волокна, 0.1945 г расширителя «Элеконт», 0.025 г стеариновой кислоты, 2.5 мл воды (температура заливаемой воды 20°C), 1.75 мл раствора серной кислоты ( $d = 1.4 \text{ г/см}^3$ ) (температура заливаемого раствора 20°C). После добавления всех компонентов и перемешивания определялись плотность пасты и температура. Температура пасты должна быть в пределах 30–40°C. Плотность определялась следующим образом: фарфоровый стакан ёмкостью 10 см<sup>3</sup> плотно наполняли пастой, при этом непрерывно постукивая. Излишки пасты удалялись шпателем. Взвешивали стакан с пастой. Плотность рассчитывали по формуле

$$P = (A - B)/10,$$

где  $A$  – масса стакана с пастой, г;  $B$  – масса пустого стакана, г; 10 – объём стакана, см<sup>3</sup>.

Плотность пасты составляла 3.4–3.8 г/см<sup>3</sup>.

Затем отрицательная активная масса наносилась на решётку из Pb-Sn сплава. Площадь электрода  $S$  составляла 19,5 см<sup>2</sup>. После намазки электроды выдерживались над водой в термостате при  $t = 60^\circ\text{C}$  в течение 24 ч и далее высушивались на воздухе. Электроды без добавки углерода также были приготовлены и использовались в качестве контрольного варианта.

Варианты исследуемых электродов представлены в табл. 1.

Тестирование исследуемых электродов проводилось в свинцово-кислотных ячейках с одним отрицательным и двумя положительными электрода-

Таблица 1

Варианты исследуемых электродов

Номер варианта	1 (контрольный вариант)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Добавка	–	ГАК-2			RFL-99.95			НСУ «С»		
Концентрация добавки, %	–	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5

ми, разделённых между собой абсорбтивно-стеклянными матричными сепараторами (фирма-производитель Hollingsworth and Vose, США). Электролитом служил раствор серной кислоты ( $d = 1.28 \text{ г·см}^{-3}$ ). Циклирование ячеек проводилось гальваностатическим способом. Первый заряд проводился трёхступенчатым гальваностатическим режимом (1-я ступень током 217 мА, 2-я ступень током 109 мА, 3-я ступень током 22 мА). Далее циклирование тестовых ячеек проводилось в двух режимах: 1) разряд током 110 мА до напряжения 1.7 В, заряд током 110 мА на 120% от ёмкости разряда, 2) разряд током 40 мА до напряжения 1.7 В, заряд током 40 мА на 120% от ёмкости разряда).

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

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

Элементный анализ углеродных добавок проводился рентгенофлуоресцентным способом методом фундаментальных параметров с помощью энергодисперсионного анализатора EDX-720 (производитель SHIMADZU, Япония). Для возбуждения спектра использовалась рентгеновская трубка с Rh-анодом (напряжение 50 кВ, ток 100 мкА).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для характеристики образцов углеродных материалов использовались следующие параметры: размер частиц, удельная поверхность, качественный состав примесей. Кривые распределения частиц порошков исследуемых углеродных материалов по размерам представлены на рис. 1 (а, б).

Из представленных данных видно, что образцы графитов RFL 99.5 М и ГАК-2 характеризуются крупным размером частиц и основная доля их приходится на размеры 300–500 мкм и 200–350 мкм соответственно. Образец углерода НСУ «С» значительно более мелкодисперсный, и размер частиц в основном приходится на диапазон 6–10 мкм.

Величины удельной поверхности углеродных материалов, определённые методом БЭТ, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Величины удельной поверхности углеродных материалов

Тип углеродной добавки	RFL-M 99.5	НСУ «С»	ГАК-2
$S_{уд}, \text{ м}^2\cdot\text{г}^{-1}$	1	65	4,0

Наиболее высокой удельной поверхностью характеризуется образец НСУ «С».

Качественный анализ примесей в углеродных добавках представлен в табл. 3.

Из представленных данных видно, что углеродные добавки RFL-M 99.5 и ГАК-2 характеризуются

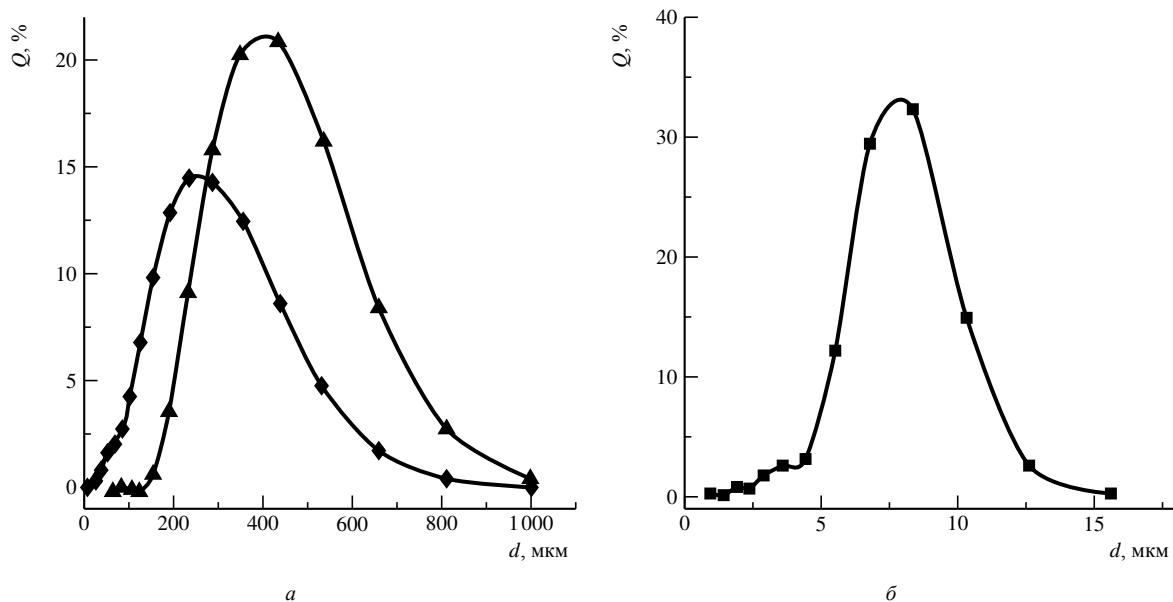


Рис.1. Кривые распределения частиц по размерам исходных исследуемых углеродных материалов: графит «ГАК-2» (◆), графит «RFL-M 99.95» (▲) (а); углерод НСУ «С» (■) (б)

ся наиболее высоким содержанием серы, а добавка НСУ «С» – железа.

На рис. 2 представлены типичные зарядно-разрядные кривые отрицательных электродов с различными углеродными добавками.

Таблица 3

Качественный анализ примесей в углеродных добавках

Элементный состав примесей, мас.%	Тип добавки		
	RFL-M 99.5	НСУ «С»	ГАК-2
S	45	12	33
Fe	9	60	25
Ni	–	15	6
Co	–	–	5
Ti	33	0.5	14
Cr	–	8	0.6
Cu	–	2	–
Ca	8	0.9	4
Si	–	–	8

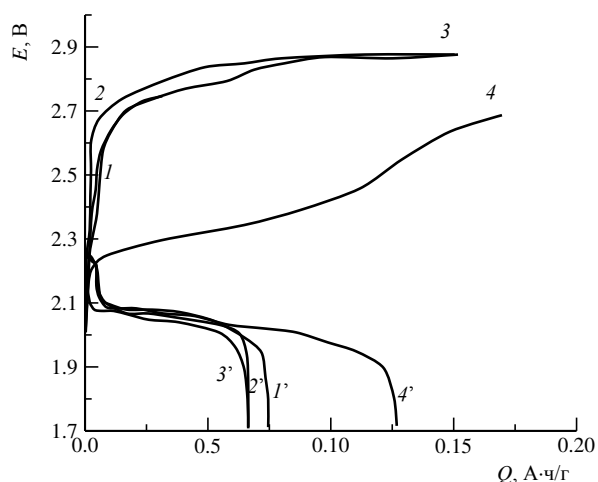


Рис. 2. Зарядно-разрядные кривые отрицательного электрода с различными углеродными добавками на 2-м цикле: 1, 1' – контрольный вариант; 2, 2' – ГАК-2; 3, 3' – RFL-M 99.5; 4, 4' – НСУ «С». Содержание добавки 1%. Режимы циклирования:  $I_{зар}=I_{раз} = 110$  мА. Заряд составлял 120% от разрядной ёмкости

Из полученных данных видно, что отрицательные электроды с добавкой НСУ «С» заряжаются при более низких напряжениях. Это связано с тем, что активная масса этого электрода имеет более высокую электропроводность.

На рис. 3 представлена зависимость разрядной ёмкости от номера цикла для электродов с содержанием углеродной добавки 1% (ток разряда составлял 40 мА).

Таким образом из рис. 3 видно, что введение добавок ГАК-2, RFL-M 99.95 не оказало существенного влияния на величину ёмкости отрицательных

электродов, лишь к 4-му циклу наблюдается незначительное её увеличение.

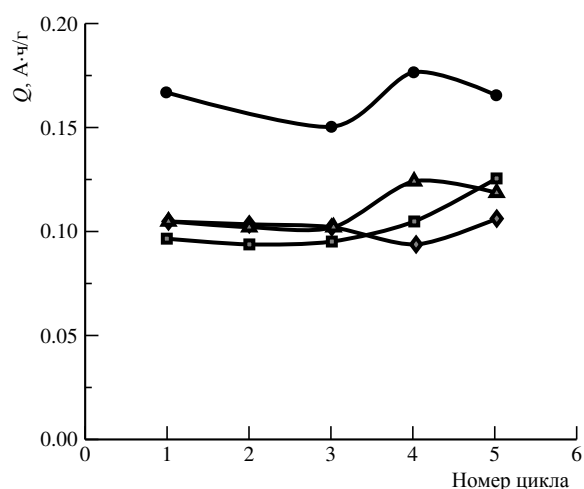


Рис. 3. Зависимость разрядной ёмкости от номера цикла для электродов с содержанием углеродной добавки 1%: контрольный вариант (♦), графит «ГАК-2» (■), графит «RFL-M 99.95» (▲), углерод НСУ «С» (●).  $I_{раз} = 40$  мА

Наибольший эффект оказала добавка НСУ «С». Введение этой добавки привело к значительному увеличению разрядной ёмкости по сравнению с контрольным вариантом. Также этот вариант электродов показал наиболее высокий коэффициент использования активной массы, который составил 65–68%.

Увеличение тока разряда до 110 мА привело к снижению ёмкости и коэффициента использования активной массы для всех вариантов электродов (табл. 4).

Как видно из представленных данных, на 1-м цикле введение добавок ГАК-2 и RFL-99.95 в количестве 0.5 мас.% снизило разрядную ёмкость электродов. А введение добавки НСУ «С» в том же количестве практически не оказало никакого влияния на величину разрядной ёмкости. К 3-му циклу все исследуемые добавки в количестве 0.5 мас.% увеличили разрядную ёмкость отрицательных электродов по отношению к контрольному варианту.

Введение указанных добавок в количестве 1 мас.% показало, что на 1-м цикле происходит снижение разрядной ёмкости в случае добавки ГАК-2, незначительное повышение ёмкости в присутствии добавки RFL-99.95 и значительное увеличение разрядной ёмкости для электродов с добавкой НСУ «С». Для 3-го цикла получены аналогичные результаты. При увеличении концентрации добавки до 1.5 мас.% было получено, что на 1-м цикле введение ГАК-2 и RFL-99.95 снижают разрядную ёмкость, а введение НСУ «С» увеличивает её значение. К 3-му циклу ёмкости контрольного варианта и вариантов с добавками ГАК-2 и RFL-99.95 имеют близкие значе-

Таблица 4

Разрядные ёмкости и коэффициенты использования исследуемых отрицательных электродов на различных циклах (ток разряда 110 мА)

Тип добавки	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл	
	$Q_{пр}, А \cdot ч \cdot г^{-1}$	$K_{исп}, \%$	$Q_{пр}, А \cdot ч \cdot г^{-1}$	$K_{исп}, \%$	$Q_{пр}, А \cdot ч \cdot г^{-1}$	$K_{исп}, \%$
Контрольный вариант	0.0999	39	0.0552	22	0.0323	13
ГАК-2						
0.5%	0.0819	32	0.0837	33	0.0671	26
1%	0.0737	29	0.0557	22	0.0148	–
1.5%	0.0570	22	0.0518	20	0.0398	16
RFL99.95						
0.5%	0.0472	19	0.0869	34	0.0458	18
1%	0.1099	–	0.0700	29	0.0500	20
1.5%	0.0625	25	0.0449	18	0.0325	13
НСУ «С»						
0.5%	0.0966	38	0.1269	49	0.0691	–
1%	0.1471	57	0.1300	49	0.1200	45
1.5%	0.1255	49	0.1192	46	0.1171	45

ния, ёмкость электрода с добавкой НСУ «С» опять показала более высокие значения.

Влияние концентраций углеродных добавок на разрядную ёмкость электродов (ток разряда 40 мА) на 1-м цикле представлено на рис. 4.

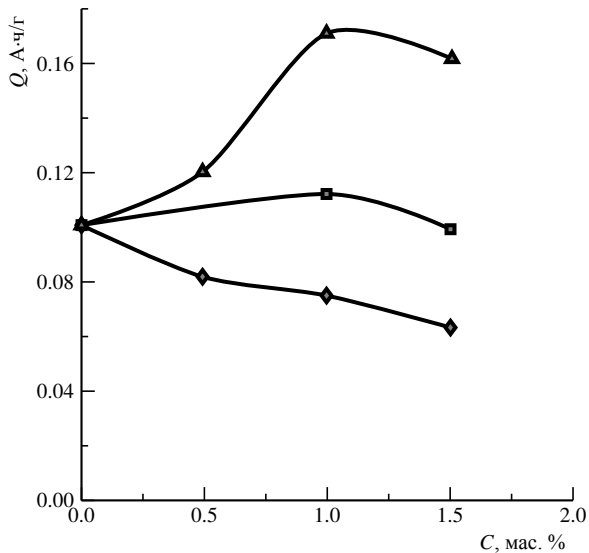


Рис. 4. Зависимость разрядной ёмкости отрицательных электродов от концентрации углеродных добавок: ГАК-2 (♦), RFL (■), НСУ (▲). На 1 цикле  $I_{разр} = 40$  мА

Из представленных результатов видно, что наиболее оптимальной добавкой в активную массу отрицательного электрода является добавка НСУ в количестве 1%. Такое влияние этой добавки связано с тем, что она имеет наиболее высокую удельную поверхность и наименьший размер частиц.

## ВЫВОДЫ

1. Проведена характеристика углеродных добавок по гранулометрическому составу и удельной поверхности. Показано, что образец НСУ «С» имеет высокую удельную поверхность  $65 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$  и наименьший размер частиц 6–10 мкм.

2. Изучено влияние углеродных добавок на ёмкость отрицательного электрода и коэффициент использования активной массы. Получено, что введение 1% углерода НСУ «С» приводит к увеличению разрядной ёмкости отрицательного электрода и увеличению коэффициента использования активной массы по сравнению с контрольным вариантом и вариантами с другими углеродными добавками.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в сфере научной деятельности (государственное задание № 4.1212.2014/К).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valve-regulated Lead-Acid Batteries / eds. D. A. J. Rand, P. T. Moseley, J. Garche, C. D. Parker. ELSEVIER, 2004.  
 2. 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. P. 134–138.  
 3. Pavlov D., Rogachev T., Nikolov P., Petkova G. Mechanism of action of electrochemically active carbons on the

processes that take place at the negative plates of lead-acid batteries // *J. Power Sources*. 2009. Vol. 191. P. 58–75.

4. Pavlov D., Nikolov P., Rogachev T. Influence of expander components on the processes at the negative plates of lead-acid cells on high-rate partial-state-of-charge cycling. Part II. Effect of carbon additives on the processes of charge and discharge of negative plates // *J. Power Sources*. 2010. Vol. 195. P. 4444–4457.

5. Fernandez M., Valenciano J., Trinidad F., Munos 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. P. 4458–4469.

6. Boden D. P., Loosemore D. V., Spense 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. P. 4470–4493.

7. Kim Kinoshita. Carbon: Electrochemical and Physicochemical Properties. N.Y.: John Wiley & Sons, 1988.

8. Carbon Black: Science and Technology / eds. J.-B. Donnet, R. C. Bansal, M.-J. Wang. N.Y.: Dekker, 1993.

9. Pavlov D., Nikolov P., Rogachev T. Influence of expander components on the processes at the negative plates of lead-acid cells on high-rate partial-state-of-charge cycling. Part I: Effect of lignosulfonates and BaSO<sub>4</sub> on the processes of charge and discharge of negative plates // *J. Power Sources*. 2010. Vol. 195. P. 4435–4443.

10. Moseley P. T., Nelson R. F., Hollenkamp A. F. The role of carbon in valve-regulated lead-acid battery technology // *J. Power Sources*. 2006. Vol. 157. P. 3–10.

11. Kimura T., Ishiguro A., Andou Y., Fujita K. Effect of electrochemically oxidized carbon colloid on lead acid batteries // *J. Power Sources*. 2000. Vol. 85. P. 149–156.

#### REFERENCES

1. Valve-regulated Lead-Acid Batteries. Eds. D. A. J. Rand, P. T. Moseley, J. Garche, C. D. Parker. ELSEVIER, 2004.

2. 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, pp. 134–138.

3. Pavlov D., Rogachev T., Nikolov P., Petkova G. Mechanism of action of electrochemically active carbons on the processes that take place at the negative plates of lead-acid batteries. *J. Power Sources*, 2009, vol. 191, pp. 58–75.

4. Pavlov D., Nikolov P., Rogachev T. Influence of expander components on the processes at the negative plates of lead-acid cells on high-rate partial-state-of-charge cycling. Part II. Effect of carbon additives on the processes of charge and discharge of negative plates. *J. Power Sources*, 2010, vol. 195, pp. 4444–4457.

5. Fernandez M., Valenciano J., Trinidad F., Munos 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, pp. 4458–4469.

6. Boden P. D., Loosemore V. D., Spense A. M., Wojcinski D. T. 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, pp. 4470–4493.

7. Kinoshita Kim. Carbon: Electrochemical and Physicochemical Properties. New York: John Wiley & Sons, 1988.

8. Carbon Black: Science and Technology. Eds. J.-B. Donnet, R. C. Bansal, M.-J. Wang. New York: Dekker, 1993.

9. Pavlov D., Nikolov P., Rogachev T. Influence of expander components on the processes at the negative plates of lead-acid cells on high-rate partial-state-of-charge cycling. Part I: Effect of lignosulfonates and BaSO<sub>4</sub> on the processes of charge and discharge of negative plates. *J. Power Sources*, 2010, vol. 195, pp. 4435–4443.

10. Moseley P. T., Nelson R. F., Hollenkamp A. F. The role of carbon in valve-regulated lead-acid battery technology. *J. Power Sources*, 2006, vol. 157, pp. 3–10.

11. Kimura T., Ishiguro A., Andou Y., Fujita K. Effect of electrochemically oxidized carbon colloid on lead acid batteries. *J. Power Sources*, 2000, vol. 85, pp. 149–156.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Данилова Вероника Олеговна** – аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского». Служебный тел.: 8452-51-64-13, e-mail: danilowa.veronicka@yandex.ru

**Бурашникова Марина Михайловна** – канд. хим. наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского». Служебный тел.: 8452-51-64-13, e-mail: burashnikova\_mm@mail.ru

**Гриценко Станислав Дмитриевич** – студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского». Служебный тел.: 8452-51-64-13, e-mail: stas-gricenko@mail.ru

**Самсонов Максим Александрович** – студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского». Служебный тел.: 8452-51-64-13, e-mail: maksimka-195@mail.ru

**Казаринов Иван Алексеевич** – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой физической химии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского». Служебный тел.: 8452-51-64-13, e-mail: KazarinovIA@mail.ru