

Темплатный синтез мезопористых углеродных материалов для электрохимических конденсаторов

* В. И. Мандзюк, И. Ф. Миронюк, В. М. Сачко, И. М. Мыкытын

Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефаника,
г. Ивано-Франковск, 76018, Украина, *e-mail: mandzyuk_vova@ukr.net

Исследовано влияние эндотемплата $AlOON$ на пористую структуру, электропроводимость и электрохимические свойства углеродных материалов, полученных из лактозы. Установлено, что при соотношении $C:AlOON = 1:1$ получается углеродный материал, обладающий удельной поверхностью $1707 \text{ м}^2/\text{г}$ и общим объемом пор $1,546 \text{ см}^3/\text{г}$. Электрохимические конденсаторы, сформированные на основе исследуемых образцов, обладают высокой удельной емкостью ($66\text{--}170 \text{ Ф/г}$) при разрядном токе 10 мА . Развита мезопористая структура углеродных материалов, синтезированных темплатным методом, позволяет осуществлять заряд/разряд электрохимических конденсаторов токами до 200 мА , обеспечивая значение удельной емкости 121 Ф/г .

Ключевые слова: мезопористый углерод, темплатный синтез, пористая структура, удельная электропроводимость, электрохимический конденсатор.

УДК 544.6+661.666

DOI: 10.5281/zenodo.1345708

ВВЕДЕНИЕ

Углеродные материалы (УМ), полученные в результате термодеструкции полимеров или природного сырья (древесины, оболочек фруктовых косточек, отходов пищевых продуктов), нашли широкое применение в современной науке и технике. Они выполняют роль сорбентов, носителей катализаторов, мембран для разделения газовых смесей, электродов гальванических источников тока, электрохимических конденсаторов (ЭК) и т.п. [1–8]. Подобные УМ должны обладать соответствующим распределением пор по размеру (РПР). Для получения желаемого распределения используются методы термической модификации и химической обработки исходного сырья или карбонизированного углерода [6, 9–13], порообразующие агенты [8, 14–17] или темплаты [18–23].

На сегодняшний день для получения пространственно упорядоченных пористых УМ используют методы экзо- и эндотемплатирования. Первый метод предполагает термолитическое разложение углеродного прекурсора в объеме пор неорганических матриц – цеолитов [24–26], кремнеземных молекулярных сит или алюмооксидных мембран [27–30]. Пустоты экзо-темплата в результате карбонизации органического вещества становятся углеродным каркасом, а на месте матрицы, после ее растворения и удаления, возникает свободный объем в виде пор и каналов. Суть эндотемплатного метода заключается в том, что объем углеродного прекурсора наполняют наночастицами неорганического оксидного материала (например, SiO_2 , Al_2O_3), а после карбонизации прекурсора их вымывают из

УМ раствором КОН, плавиковой или соляной кислотой [31–33].

Одним из эндотемплатов, которые могут использоваться для коррекции пористой структуры УМ, является мезопористый гидроксид алюминия $AlOON$, получаемый в процессе термодеструкции девятиводного нитрата алюминия $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ [34]. Поэтому цель данной работы – получение УМ с использованием эндотемплата $AlOON$, выяснение его влияния на пористую структуру, электропроводимость УМ и электрохимические свойства ЭК, сформированных на их основе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из кристаллической D-лактозы ($C_{12}H_{22}O_{11}$) как прекурсора получали уголь при температуре 400°C в течение 30 мин в атмосфере воздуха. Дальнейшая термоокислительная активация угля проводилась при температуре 800°C в течение 30 мин в атмосфере аргона. Данный материал в работе обозначен как образец 1.

Образец 2 (который использовали для сравнения) формировали путем смешивания насыщенного раствора активирующего агента (КОН) и D-лактозы в соотношении 1:3 и нагревания смеси до жидкой однородной консистенции. После упаривания ($100\text{--}175^\circ\text{C}$) и карамелизации ($220\text{--}230^\circ\text{C}$) композиционную смесь карбонизировали при температуре 350°C в течение 1 ч. После этого смесь углерода с реагентом нагревали в атмосфере аргона при температуре 800°C в течение 30 мин.

Для осуществления эндотемплатного синтеза УМ D-лактозу смешивали с девятиводным нитратом алюминия $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ в соотно-

шении 3:1 (образец 3) и 1:1 (образец 4). После проведения термолитического разложения дихлоридного прекурсора, содержащего в своем составе молекулы нитрата алюминия, образуется композиционный материал С-АlOOH. Данный материал просачивался раствором КОН, сушился и прожаривался при 800°C в течение 40 мин. КAlO₂, сформированный в объеме УМ, вымывался водой.

Структурно-адсорбционные характеристики УМ определяли по изотермам адсорбции/десорбции азота. Измерение величины адсорбции/десорбции азота в зависимости от давления адсорбата проводилось при температуре кипения сжиженного азота ($T = 77$ К) на автоматическом сорбтометре Quantachrome Autosorb (Nova 2200e). Перед измерениями исследуемые материалы нагревались в вакууме при температуре 180°C в течение 24 часов. Общую удельную поверхность пор ($S_{\text{ВЕТ}}$) определяли методом ВЕТ [35], удельную поверхность ($S_{\text{микро}}$) и объем ($V_{\text{микро}}$) микропор – t -методом [36], поверхность ($S_{\text{мезо}}$) и объем ($V_{\text{мезо}}$) мезопор рассчитывали как разницу между общей поверхностью (объемом) пор и микропор. Общий объем пор (V) определяли по количеству адсорбированного азота при давлении $p/p_0 \approx 0,99$ (где p и p_0 – давление пара азота и давление его насыщенного пара при температуре 77 К соответственно). Расчет РПП осуществляли NLDFT (nonlocal density functional theory) методом [37] в приближении щелевидных (образцы 1, 2) и щелевидных/цилиндрических (образцы 3, 4) пор. Относительная погрешность определения параметров пористой структуры не превышала 10%.

Для исследования электропроводящих характеристик УМ использовали конденсаторную систему, состоящую из двух медных электродов, между которыми находился исследуемый образец. Импедансные годографы $Z'' = f(Z')$, где Z' и Z'' – действительная и мнимая части комплексного сопротивления системы соответственно, получали с использованием амплитудно-частотного анализатора Autolab/FRA-2 (ECO CHEMIE, Нидерланды) в диапазоне частот 10^{-2} – 10^5 Гц. Амплитуда синусоидального напряжения составляла 10 мВ. С учетом геометрических параметров образцов рассчитывались удельные значения сопротивлений, электропроводимости и частотные зависимости электрических параметров согласно уравнениям:

$$\rho^* = \rho' - j\rho'', \quad (1)$$

где $\rho' = Z'A/d$ и $\rho'' = Z''A/d$, A и d – площадь поверхности электрода и толщина образца соответственно. Комплексная удельная проводимость определялась из соотношений:

$$\sigma^* = 1/\rho^* = \sigma' + j\sigma'', \quad (2)$$

где $\sigma' = \rho'/M$, $\sigma'' = \rho''/M$, $M = |Z^*|^2 (A/d)^2$, а полная проводимость рассчитывалась по формуле [38]:

$$\sigma^* = \sqrt{(\sigma')^2 + (\sigma'')^2}. \quad (3)$$

Относительная погрешность определения электропроводимости УМ не превышала 5%.

Для изготовления электродов симметричного ЭК использовали смесь УМ и токопроводящей добавки (графит KS-15 фирмы Lonza) в массовом соотношении 75:25. Полученные электроды пропитывали электролитом, разделяли сепаратором и помещали в двухэлектродную ячейку типоразмера “2525”, после чего ее герметизировали. В качестве электролита использовали 30% водный раствор КОН.

Для исследования электрохимических свойств ЭК с электродами на основе опытных образцов УМ применяли методы гальваностатического циклирования и циклической вольтамперометрии. Измерения осуществляли на приборе Autolab (ECO CHEMIE, Нидерланды), укомплектованном программой GPES.

Гальваностатические измерения проводили в диапазоне напряжений $0 \div 1$ В, ток заряда/разряда ЭК изменялся в пределах от 10 до 200 мА с шагом 10 мА. Удельную емкость электродного материала ЭК рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{2It}{(U_{\text{max}} - \Delta U)m}, \quad (4)$$

где I – зарядный/разрядный ток; t – время разряда; U_{max} – максимальное напряжение; ΔU – падение напряжения при замыкании разрядной цепи; m – масса УМ.

Внутреннее сопротивление ЭК определяли по скачку потенциала после десяти циклов заряда/разряда конденсатора согласно равенству:

$$R = \frac{\Delta U}{2I}. \quad (5)$$

Относительная погрешность определения удельной емкости и внутреннего сопротивления не превышала 5%.

Циклические вольтамперограммы ЭК записывали в диапазоне напряжений $0 \div 1$ В; скорость сканирования $s = dU/dt$ составляла 1, 5, 10 и 20 мВ/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Необходимую информацию для расчета структурно-морфологических характеристик опытных образцов УМ предоставляют экспериментальные зависимости изменения объема V

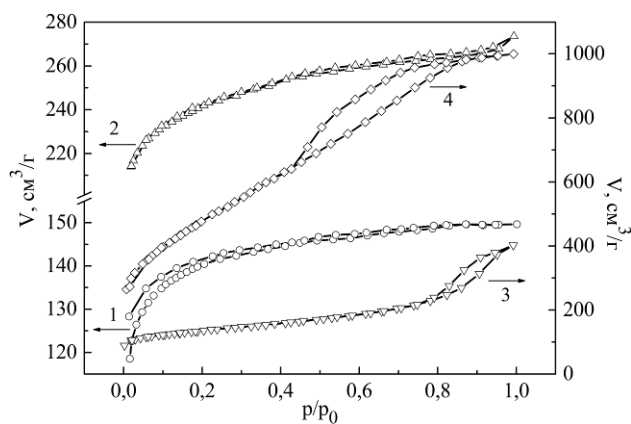


Рис. 1. Изотермы адсорбции/десорбции азота для образцов 1 (кривая 1), 2 (2), 3 (3) и 4 (4).

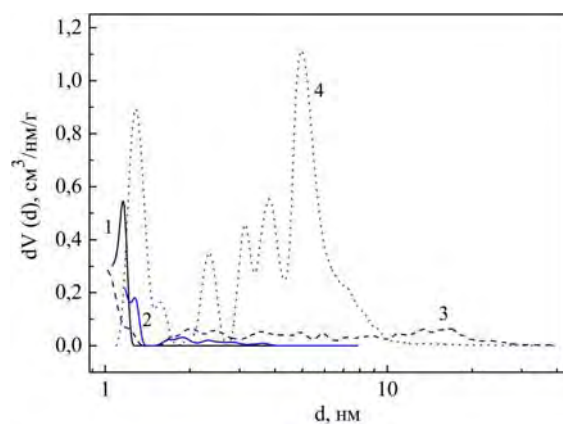


Рис. 2. Распределение пор по размерам для УМ (номер кривой соответствует номеру образца).

Таблица 1. Параметры пористой структуры углеродных материалов

Образец	$S_{ВЕТ}$, $M^2/Г$	$S_{микро}$, $M^2/Г$	$S_{мезо}$, $M^2/Г$	V , $CM^3/Г$	$V_{микро}$, $CM^3/Г$	$V_{мезо}$, $CM^3/Г$
1	499	455	44	0,222	0,198	0,024
2	1078	880	198	0,463	0,359	0,104
3	481	215	266	0,623	0,093	0,530
4	1707	461	1246	1,546	0,247	1,299

адсорбированного/десорбированного азота от величины его относительного давления p/p_0 при постоянной температуре (рис. 1).

Важным признаком изотерм для образцов 1 и 2 является то, что при достижении давления насыщенного пара p_0 регистрируется предельное значение величины адсорбции. Адсорбционные зависимости с этим признаком характерны для мономолекулярной адсорбции веществ микропористыми сорбентами. По классификации IUPAC они относятся к I типу [39]. Указанные изотермы характеризуются открытой петлей гистерезиса, причиной чего может быть наличие длинных и узких пор с узкими горлышками, размер которых близок к размеру молекул азота [39]. В частности, гистерезис изотермы образца 1 регистрируется во всем диапазоне относительных давлений p/p_0 , а для образца 2 – в пределах $0,1 \div 1,0 p/p_0$.

Для образцов 3 и 4 изотермы характеризуют процессы полимолекулярной адсорбции в микро- и мезопорах материалов органического происхождения [40]. Форма петли гистерезиса относится к типу H4 [39], который связывают с капиллярной конденсацией в мезопорах.

По данным расчета параметров пористой структуры УМ (табл. 1) видим, что неактивированный углерод (образец 1) имеет умеренную удельную поверхность $499 \text{ м}^2/\text{г}$ и небольшой объем пор $0,222 \text{ см}^3/\text{г}$. В результате активационных термохимических процессов с участием КОН удельная поверхность и общий объем пор образца 1 увеличиваются в 2,1 раза (образец 2). Наблюдается также незначительный рост мезопор от 9 до 18%.

Значительные изменения пористой структуры наблюдаются в результате использования эндотемплата AlOOH. В частности, хотя рост удельной поверхности образца 3 не отмечается, однако объем пор увеличивается почти в 3 раза и происходит значительное развитие мезопор. При соотношении C:AlOOH = 1:1 (образец 4) удельная поверхность и объем пор растут соответственно в 3,4 и 7 раз, а количество мезопор составляет 85%.

Изменения пористой структуры УМ в результате термохимической активации и эндотемплатирования подтверждаются кривыми РПР (рис. 2). Неактивированный углерод является микропористым – большинство его пор имеют размер 1,17 нм (рис. 2, кривая 1). Образец 2 в основном является также микропористым с максимумами вблизи 1,3 и 1,5 нм. Материал содержит незначительное количество мезопор (18%) с максимумом вблизи 2,2 нм (рис. 2, кривая 2). Образец 3 характеризуется интенсивным максимумом вблизи 1 нм, который соответствует микропорам, и достаточно широким распределением мезопор в диапазоне от 2 до 25 нм (рис. 2, кривая 3). Наиболее заметные изменения в РПР по отношению к исходному материалу наблюдаются для образца 4 (рис. 2, кривая 4). Эндотемплатирование прекурсора на основе лактозы гидроксидом алюминия создает предпосылки для формирования микромезопористой структуры, в которой максимум в распределении микропор лежит вблизи 1,3 нм, а мезопор – 5 нм. Менее интенсивные максимумы в распределении мезопор наблюдаются при 2,4, 3,1 и 3,8 нм. Сопоставляя результаты низкотем-

пературной порометрии с данными по изучению процессов термодеструкции девятиводного нитрата алюминия $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ [34], становятся понятными различия в РПП исследуемых образцов. При термолитическом разложении дисахаридного прекурсора, содержащего в своем составе молекулы нитрата алюминия, образуется композиционный материал С-АlOOH, в котором объем углеродистой матрицы заполнен глобулами бемитной фазы диаметром 3–5 нм. Изъятие этой фазы из объема УМ методом выщелачивания позволяет получать мезопористый углерод с большим объемом пор.

Одним из качеств, которым должен обладать материал, чтобы использоваться как электрод литиевых источников тока или ЭК, является высокое значение его электропроводности, что позволяет осуществлять заряд/разряд электрохимического элемента большими токами.

С целью оценки значения удельной электропроводности исследуемых материалов были сняты диаграммы Найквиста $Z'' = f(Z')$ (рис. 3). Как видно из полученных диаграмм, в высокочастотной области спектра всех образцов присутствует индуктивная составляющая. Ее наличие связано с перколяционным механизмом прохождения носителей электрического заряда через смесь проводящих и непроводящих частиц материала, где непроводящими частицами являются именно поры. Таким образом, в результате сложной траектории движения носителей заряда углеродистая структура электродного материала становится аналогом индуктивности. При уменьшении частоты электрического потенциала изменение претерпевает только действительная составляющая сопротивления. Значение мнимого сопротивления сначала уменьшается, а затем остается неизменным.

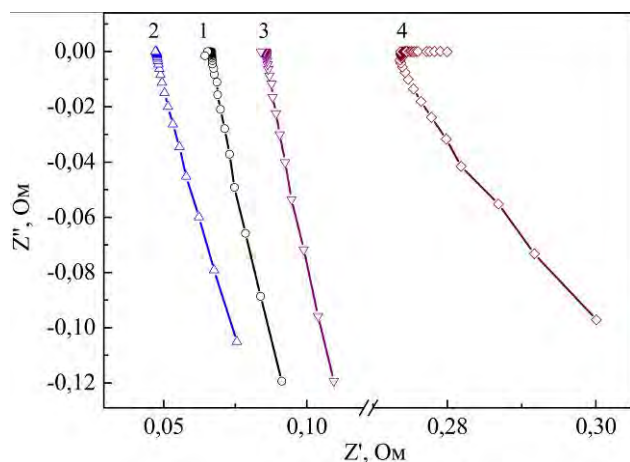


Рис. 3. Диаграммы Найквиста для образцов 1 (кривая 1), 2 (2), 3 (3) и 4 (4).

Используя значения Z' и Z'' , по формулам (1)–(3) были рассчитаны действительная σ' , мнимая σ'' и полная σ^* , удельные проводимости

УМ и найдены их зависимости от частоты. Поскольку значение действительной составляющей электрической проводимости при частотах, меньших 10^3 Гц, примерно на 2–3 порядка больше значения мнимой составляющей, то вкладом последней в полную проводимость УМ можно пренебречь. При таких обстоятельствах полное сопротивление будет определяться в основном частотной зависимостью действительной составляющей электропроводности. Представление частотных зависимостей электрической проводимости в полулогарифмических координатах позволяет определить значение удельной электропроводности УМ путем экстраполяции экспериментальной кривой до ее пересечения с осью σ^* (при $f \rightarrow 0$ имеем выход на постоянный ток) (рис. 4).

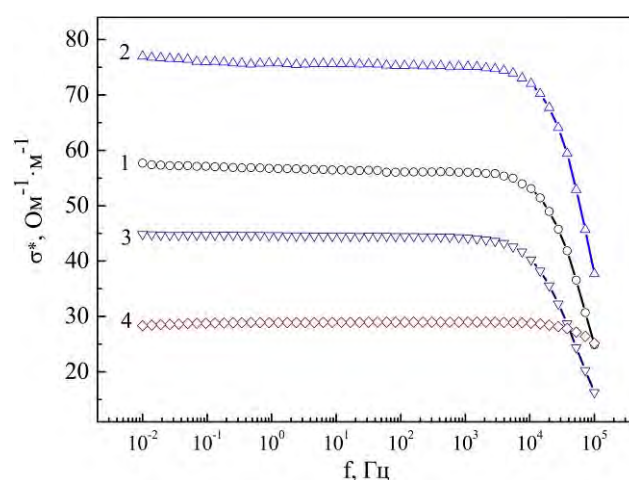


Рис. 4. Частотная зависимость полной проводимости для образцов 1 (кривая 1), 2 (2), 3 (3) и 4 (4).

Таблица 2. Удельная проводимость ($\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) углеродных материалов

Образец	Удельная проводимость
1	58
2	78
3	45
4	28

Проведенные расчеты позволили выяснить, что высокотемпературная активация УМ с использованием КОН повышает удельную электропроводность материала в 1,34 раза (табл. 2). Такой результат воздействия КОН на электропроводность УМ связан с интеркаляцией ионов K^+ в межлистовые слои углеродных микрокристаллитов, что способствует их структурной перестройке при высоких температурах в графитоподобное состояние. При использовании темплата АlOOH происходит уменьшение удельной проводимости материала за счет увеличения количества мезопор, которые выполняют роль барьеров для прохождения электрического заряда через образец.

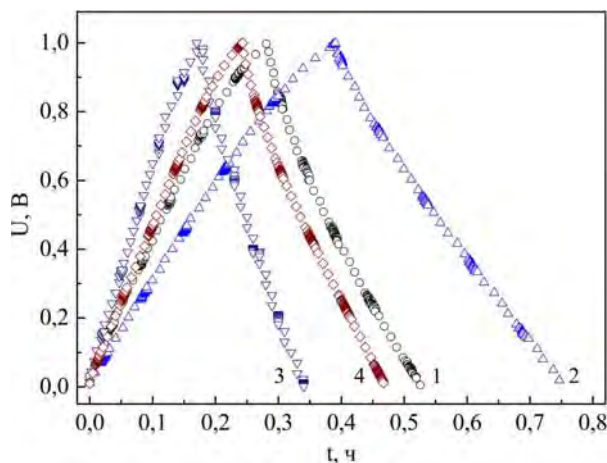


Рис. 5. Зарядные/разрядные кривые для ЭК на основе образцов 1 (кривая 1), 2 (2), 3 (3) и 4 (4).

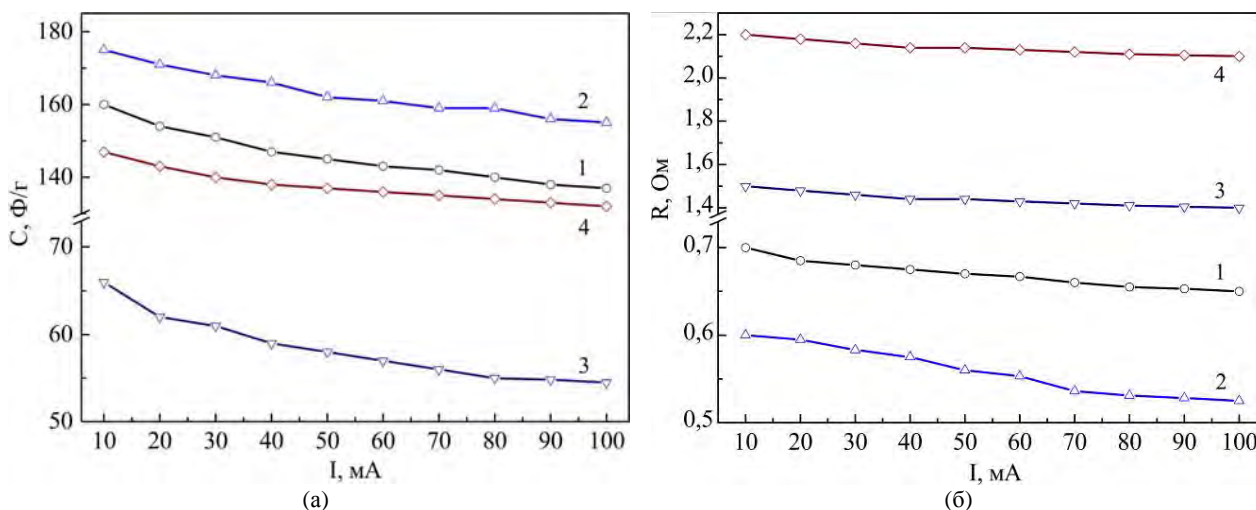


Рис. 6. Зависимость удельной емкости (а) и внутреннего сопротивления (б) от разрядного тока ЭК на основе образцов 1 (кривая 1), 2 (2), 3 (3) и 4 (4).

Чтобы выяснить возможность использования УМ, полученных методом эндотемплатирования, в качестве электродов ЭК были проведены гальваностатические исследования. Из зависимости $U = f(t)$ (рис. 5) по формулам (4) и (5) соответственно были рассчитаны значения удельной емкости электродных материалов и внутреннего сопротивления ЭК.

Анализируя приведенные на рис. 6а зависимости, приходим к выводу, что наибольшую удельную емкость (176–157 Ф/г) при разрядном токе 10–100 мА демонстрирует образец 2. Удельная емкость исходного материала (образец 1) при указанных разрядных токах несколько меньше (160–137 Ф/г) за счет его меньшей удельной поверхности. Применение эндотемплата AlOON приводит к уменьшению удельной емкости ЭК, сформированных на основе образцов 3 и 4. В случае образца 3 это обусловлено уменьшением в 2 раза удельной поверхности микропор (относительно образца 1), которые задействованы в формировании двойного электрического слоя (ДЭС) и обеспечивают емкость ЭК при почти одинаковой вели-

чине удельной поверхности материала. Меньшие значения удельной емкости ЭК на основе образца 4 (147–132 Ф/г) можно объяснить существенным уменьшением поверхности микропор относительно полной поверхности материала (для образца 1 $S_{\text{микро}}/S_{\text{ВЕТ}} \approx 91\%$, для образца 4 – 27%).

Перераспределение в соотношении микро- и мезопор, вызванное как термохимической активацией, так и методом эндотемплатирования, приводит к изменению внутреннего сопротивления ЭК (рис. 6б). Наблюдается определенная корреляция между значением удельной электропроводности УМ (табл. 2) и величиной внутреннего сопротивления ЭК.

Одним из критериев выбора максимального зарядного/разрядного тока при циклировании ЭК является уменьшение падения напряжения ΔU при замыкании разрядной цепи не более чем на 20% от максимального напряжения (в данном случае 1 В), то есть на 0,2 В [41]. Для ЭК, сформированных на основе образцов 1 и 2, такое падение напряжения наблюдается уже при разрядном токе 100 мА. В противоположность

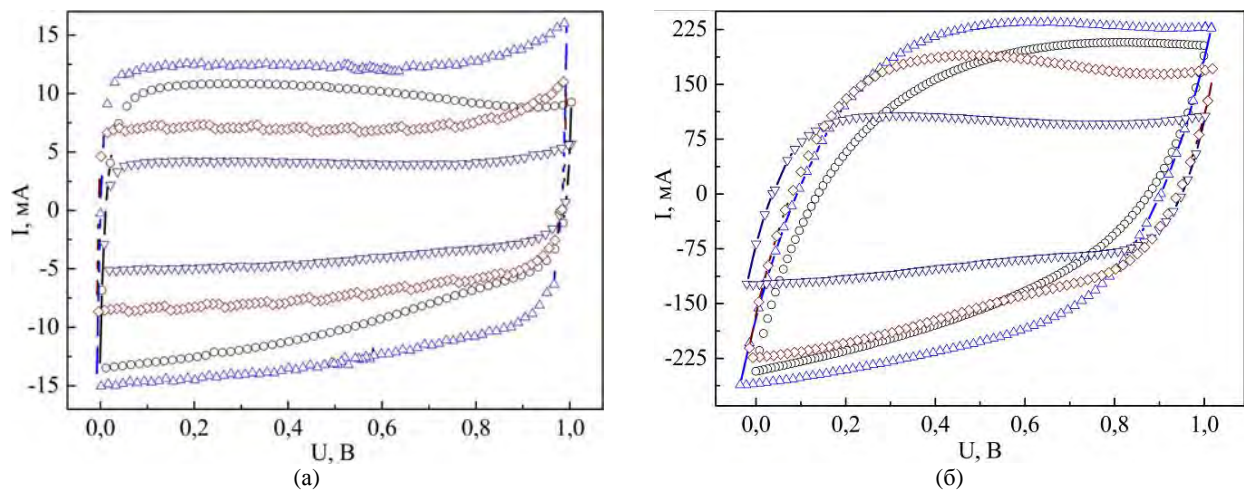


Рис. 7. Циклические вольтамперограммы ЭК на основе образцов 1 (—○—), 2 (—Δ—), 3 (—▽—) и 4 (—◇—) при скоростях сканирования 1 мВ/с (а) и 20 мВ/с (б).

этому ЭК, сформированные на основе образцов 3 и 4, выдерживают циклирование при токах 110–170 мА и 110–200 мА соответственно, обеспечивая значение удельной емкости на уровне 54–52 и 131–121 Ф/г. Использование эндотемплата в процессе получения материала приводит к росту числа мезопор (табл. 1), которые, будучи транспортными порами, обеспечивают быстрый доступ ионов электролита к поверхности материала при больших зарядных/разрядных токах.

По данным циклической вольтамперометрии, вольтамперограммы, полученные при меньшей скорости сканирования (1 мВ/с), имеют симметричную почти прямоугольную форму (рис. 7а). Такая форма вольтамперограмм свидетельствует, что накопление заряда в ЭК происходит вследствие формирования ДЭС на границе раздела поверхности электродного материала и электролита, а побочные окислительно-восстановительные реакции (так называемые фарадеевские процессы) отсутствуют.

При большей скорости сканирования (20 мВ/с, рис. 7б) прямоугольная форма вольтамперограмм несколько нарушается, что обусловлено ростом сопротивления электрохимической системы вследствие локального уменьшения концентрации ионов электролита в микропорах электродного материала – так называемый эффект «голодания» электролита [42]. Наиболее заметны эти изменения для образцов 1 и 2, в которых доминируют микропоры. Для образцов 3 и 4, в которых уже преобладают мезопоры, отклонения от прямоугольной формы менее существенные, что подтверждает результаты гальваностатических исследований о возможности разряда/заряда ЭК на основе данных материалов большими токами.

ВЫВОДЫ

Предложен способ получения синтетического УМ с использованием лактозы (как прекурсора)

и мезопористого гидроксида алюминия $Al(OH)_3$ (как темплата), который можно получить в процессе термодеструкции девятиводного нитрата алюминия $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$.

Удельная поверхность и объем пор синтезированного образца при соотношении $C:Al(OH)_3 = 1:1$ возрастают соответственно в 3,4 и 7 раз по отношению к исходному материалу, а доля мезопор составляет 85%. Увеличение количества мезопор является причиной уменьшения удельной электропроводности материала в 2 раза.

ЭК, сформированный на основе мезопористого углерода, демонстрирует несколько меньшую удельную емкость (147 Ф/г при разрядном токе 10 мА) в отличие от конденсатора на основе углерода из лактозы (160 Ф/г при том же разрядном токе), однако за счет развитой мезопористой структуры позволяет разрядку токами до 200 мА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bansal C.R., Donnet J.B. and Stoeckli F. *Active Carbon*. New York: Marcel Dekker, 1988.
2. Rachiy B.I., Budzulyak I.M., Ivanenko E.A. and Revo S.L. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2015, **51**(5), 501–508.
3. Nowicki P., Skrzypczak M. and Pietrzak R. *Chem Eng J*. 2010, **162**, 723–729.
4. Huang S. and Shi J. *Ind Eng Chem Res*. 2014, **53**, 4888–4893.
5. Fuertes A.B. and Sevilla M. *Carbon*. 2015, **94**, 41–52.
6. Ostafiychuk B.K., Budzulyak I.M., Rachiy B.I., Vashchynsky V.M. et al. *Nanoscale Res Lett*. 2015, **10**, 1–8.
7. Миронюк І.Ф., Мандзюк В.І., Сачко В.М. *Фізика і Хімія Твердого Тіла*. 2016, **17**(2), 262–268.
8. Myronyuk I.F., Mandzyuk V.I., Sachko V.M., Lisovsky R.P. et al. *J Nano-Electron Phys*. 2016, **8**(4), 04006-1–04006-7.

9. Zhang H., Bhat V.V., Gallego N.C. and Contescu C.I. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2012, **4**, 3239–3246.
10. Rosas J.M., Berenguer R., Valero-Romero M.J., Rodríguez-Mirasol J. et al. *Front mater*. 2014, **1**, 1–17.
11. Rachiy B.I., Ostafiychuk B.K., Budzulyak I.M., Vashchynsky V.M. et al. *J Nano-Electron Phys*. 2014, **6**(4), 04031-1–04031-6.
12. Ostafiychuk B.K., Budzulyak I.M., Kuzyshyn M.M., Rachiy B.I. et al. *J Nano-Electron Phys*. 2013, **5**(3), 03049-1–03049-6.
13. Revo S.L., Budzulyak I.M., Rachiy B.I. and Kuzishin M.M. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2013, **49**(1), 68–72.
14. Carvalho A.P., Gomes M., Mestre AS, Pires J. and et al. *Carbon*. 2004, **42**, 672–674.
15. Hayashi J., Uchibayashi M., Horikawa T., Muroyama K. et al. *Carbon*. 2002, **40**, 2747–2752.
16. Molina-Sabio M. and Rodriguez-Reinoso F. *Coll Surf A Physicochemical Eng Aspects*. 2004, **241**, 15–25.
17. Yorgun S., Vural N. and Demiral H. *Micropor Mesopor Mater*. 2009, **122**, 189–194.
18. Gu W. and Yushin G. *WIREs Energy Environ*. 2014, **3**, 424–473.
19. Shcherban N.D. and Ilyin V.G. *Chem Phys Tech Surf*. 2015, **6**, 97–121.
20. Sakintuna B. and Yürüm Y. *Ind Eng Chem Res*. 2005, **44**, 2893–2902.
21. Ryoo R., Joo S.H. and Jun S. *J Phys Chem B*. 1999, **103**, 7743–7746.
22. Liang C. and Dai S. *J Am Chem Soc*. 2006, **128**, 5316–5317.
23. Yoon S.B., Kim J.Y. and Yu J.S. *Chem. Commun*. 2002, **14**, 1536–1537.
24. Kyotani T., Ma Z. and Tomita A. *Carbon*. 2003, **41**, 1451–1459.
25. Rodriguez-Mirasol J., Cordero I., Radovic L.R. and Rodriguez J.J. *Chem Mater*. 1998, **10**, 550–558.
26. Ma Z., Kyotani T. and Tomita A. *Chem Commun*. 2000, **23**, 2365–2366.
27. Jun S., Joo S.H., Ryoo R., Kruk M. et al. *J Am Chem Soc*. 2000, **122**, 10712–10713.
28. Xia Y. and Mokaya R. *Adv Mater*. 2004, **16**, 886–891.
29. Lu A., Kiefer A., Schmidt W. and Schüth F. *Chem Mater*. 2004, **16**, 100–103.
30. Alvarez S. and Fuertes A.B. *Carbon*. 2004, **42**, 433–436.
31. Jang J. and Lim B. *Adv Mater*. 2002, **14**, 1390–1393.
32. Yoon S.B., Chai G.S., Kang S.K., Yu J.S. et al. *J Am Chem Soc*. 2005, **127**, 4188–4189.
33. Kyotani T., Tsai L.F. and Tomita A. *Chem Mater*. 1995, **7**, 1427–1428.
34. Myronyuk I.F., Mandzyuk V.I., Sachko V.M. and Gun'ko V.M. *Nanoscale Res Lett*. 2016, **11**, 1–8.
35. Brunauer S., Emmett P.H. and Teller E. *J Am Chem Soc*. 1938, **60**, 309–319.
36. Lozano-Castelló D., Suárez-Garsía F., Cazorla-Amorós D. and Linares-Solano Á. *Carbons for Electrochemical Energy Storage Systems*. Boca Raton-New York: CRC Press-Taylor and Francis Group, 2002, part 4, pp. 115–162.
37. Neimark A.V. and Ravikovitch P.I. *Micropor Mesopor Mater*. 2001, **44-45**, 697–707.
38. Abdullah M.H. and Yusoff A.N. *J Alloy Compd*. 1996, **233**, 129–135.
39. Gregg S.J. and Sing K.S.W. *Adsorption, surface area and porosity*. 2nd ed. London: Academic Press, 1982.
40. Marsh H. and Rodriguez-Reinoso F. *Activated carbon*, Amsterdam: Elsevier, 2006.
41. Kurzweil P. *Proceeding of the 12-th international seminar on double layer capacitors and similar energy storage devices*, Florida, Deerfield Beach, 2004, vol. 14, pp. 18–32.
42. Wang H. and Pilon L. *Electrochim Acta*. 2012, **64**, 130–139.

Посмунула 02.03.18

Summary

The effect of AIOOH endo-template on the porous structure, electrical conductivity and electrochemical properties of lactose-derived carbon materials was investigated. It was found that a carbon material with specific surface of 1707 m²/g and total pore volume of 1.546 cm³/g could be obtained when the mass ratio of C:AIOOH is 1:1. Electrochemical capacitors, formed on the base of the synthesized samples, have a large range of the specific capacity (66–170 F/g) at a discharge current of 10 mA. The developed mesoporous structure of the carbon materials synthesized via the template method allows charge/discharge electrochemical capacitors at currents up to 200 mA, providing specific capacity of 121 F/g.

Keywords: mesoporous carbon, template synthesis, porous structure, specific conductivity, electrochemical capacitor.