

Изготовление электродных материалов накопителей энергии на основе графеноподобного углерода, полученного из луковой шелухи

Ә.Н. Дүйсенбек^{1*}, Е.Е. Бейсенова^{1,2}, К. Аскарулы^{1,2}, Р.Е. Бейсенов³,
А.Д. Кудайбергенов¹, А.Б. Толынбеков², С. Тұрсынтай¹, А.Е. Манханова³

¹Satbayev University, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан

²Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

³Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлен синтез графеноподобного углерода из луковой шелухи (ГПУ), использованной в качестве прекурсора, для изготовления электродных материалов накопителей энергии. ГПУ был синтезирован из луковой шелухи (ЛШ) методом предварительной карбонизации при температуре 550 °С и последующей термохимической активации в КОН при температуре 850 °С в реакторе из нержавеющей стали. Структура и морфология полученных образцов ГПУ были исследованы методами СЭМ, рентгенодифракционного анализа, Рамановской спектроскопии. Электрохимические и вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов определяли с использованием потенциостат-гальваностата Elins P-40X. Морфология поверхности образца ГПУ–ЛШ показывает, что при карбонизации при температуре 550 °С появляется характерное термическое расслоение материала, которое после активации в КОН при температуре 850 °С позволяет получить развитую поверхность с чешуйками графеноподобного углерода. На рентгеновской дифрактограмме отмечены уширенные пики в области 2θ 40–50°, характерные для графеноподобных структур. Рамановская спектроскопия определила образование многослойного графена с большим количеством структурных дефектов. Синтезированный порошок ГПУ–ЛШ применялся в качестве активного материала при сборке двухслойного электрохимического конденсатора. Собранный конденсатор показал следующие электрохимические характеристики – значение удельной емкости 130 Ф/г и кулоновский КПД 94,7% при гравиметрической плотности тока 1000 мА/г. Полученные результаты демонстрируют эффективность применения графеноподобного углерода, полученного из биоотходов – луковой шелухи, который является перспективным материалом для суперконденсаторов с высоким рабочим напряжением.

Ключевые слова: суперконденсаторы, карбонизация, активация, активированный уголь, электрод, графитизация.

1. Введение

Значительные улучшения в области устройств для хранения энергии, таких как литий-ионные батареи, натрий-ионные батареи и суперконденсаторы, привели к увеличению разработки электрических транспортных средств и портативных электроинструментов в повседневной жизни [1]. Среди различных систем хранения энергии суперконденсаторы получили больше внимания в высокопроизводительных приложениях благодаря своим характеристикам, таким как высокая плотность мощности, умеренная плотность энергии, долгий срок службы и широкий спектр примене-

ния от портативных электронных устройств до гибридных электрических транспортных средств [2]. В работах [3-7] для создания суперконденсаторов используются углеродные материалы, полученные из биомассы, такие как отходы чая [8], волокна джута [9], шишки сосны [10], отходы кофейного порошка [11], скорлупа кокоса [12], кожура банана [13], зерна кукурузы [14], благодаря их естественному происхождению, низкой стоимости и иерархической структуре. Обычно углеродные материалы на основе биомассы для суперконденсаторов подвергаются обработке для увеличения специфической поверхности в процессе активации, что приводит к увеличению

электрохимической емкости хранения. Для достижения необходимой пористости используются различные активирующие агенты, такие как K_2CO_3 [15], KOH [16] и $ZnCl_2$ [17].

В настоящей работе в качестве эффективного активного материала для высокопроизводительных суперконденсаторов с высокой плотностью мощности использовали графеноподобный углерод, полученный из луковой шелухи, который обладает превосходной структурой благодаря своей уникальной природной особенности [18-21]. Луковая шелуха представляет собой природный биоотходный материал с высоким содержанием углерода, которая может быть подвергнута обработке с целью создания структуры, подобной графену, с высоким значением активной поверхности, а также обладающей высокой электропроводностью. Уникальная структура способствует накоплению большого числа носителей заряда на интерфейсе электрода. Кроме того, данный материал доступен по стоимости, широко распространен и экологически безопасен, что делает его перспективным для приложений по масштабному энергоснабжению. Тем не менее, требуются дополнительные исследования для оптимизации процесса изготовления и повышения характеристик суперконденсаторов на базе графеноподобного углерода из луковой шелухи.

2. Экспериментальные методы и материалы

Луковая шелуха (доставлена с местного рынка Алматы, Казахстан), гидроксид калия (KOH , $\geq 85\%$, Sigma Aldrich), газ аргон (99,993%, Ikhsan Technogas Ltd), проводящий углеродный черный порошок (EQ-Lib-SuperC45, MTI Corporation), поливинилфторид (PVDF, EQ-Lib-PVDF, MTI Corporation), 1-метил-2-пирролидон (NMP, $\geq 99,0\%$, Sigma Aldrich), фольга никеля (MF-Ni-Foil-25u-105, MTI Corporation).

Исходный прекурсор, луковая шелуха (ЛШ), была доставлена с местного рынка и промыта горячей дистиллированной водой для удаления загрязнений. Очищенную шелуху измельчали в циркониевой ступке до порошкообразной массы и высушивали в сушильном шкафу при $120\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 8 часов. Синтез графеноподобного углерода проводили в два этапа:

1) на первом этапе проводили карбонизацию луковой шелухи (КЛШ) в реакторе (нержавеющая сталь AISI 304) при температуре $550\text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере аргона в течение 100 мин со скоростью нагрева $7\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$;

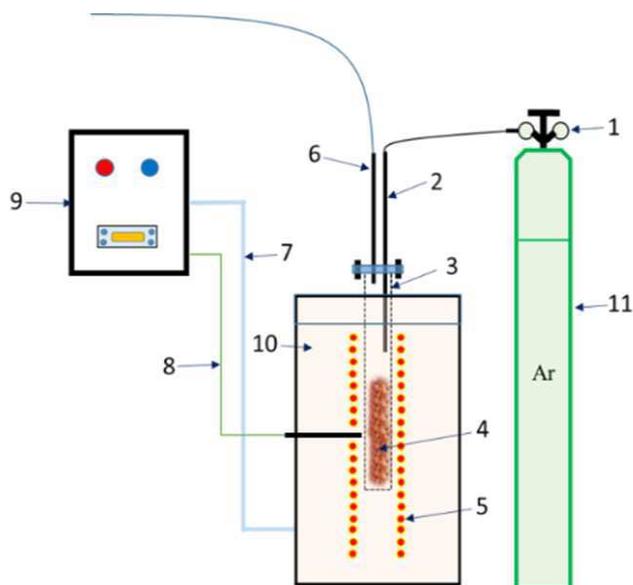


Рис. 1. Схема установки: 1 – манометр; 2 – трубка подачи газа; 3 – реактор; 4 – исходный материал; 5 – нагреватель; 6 – трубка выхода газа; 7 – питание; 8 – термопара; 9 – контроллер; 10 – печь; 11 – газовый баллон.

2) на втором этапе получали графеноподобный углерод химической активацией при добавлении в полученную КЛШ KOH в весовом соотношении 1:4 с последующим нагревом до температуры $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 90 минут (рис. 1). Скорость продувки инертным газом (Ar) составляла $450\text{ см}^3/\text{мин}$. Полученный графеноподобный углерод из луковой шелухи (ГПУ–ЛШ) промывали горячей дистиллированной водой до нейтрального pH и высушивали при $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Электродный материал готовили путем смешивания ГПУ–ЛШ, электропроводящей сажи и поливинилфторида в соотношении 70:20:10. Суспензию для нанесения на токосъемный элемент получали смешиванием 1 г порошка с 4 мл растворителя N-метил-2-пирролидон. Полученную смесь наносили на квадратный сантиметр никелевой фольги и сушили при температуре $130\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 часов. Электрохимические измерения проводились с использованием потенциостат-гальваностата Elins P-40X. Данные циклической вольтамперометрии были получены при различных скоростях сканирования. Измерения гальваностатической разрядки проводились при различных значениях удельного тока. Электрохимическая импедансная спектроскопия измерялась в диапазоне частот от 100 кГц до 10 МГц .

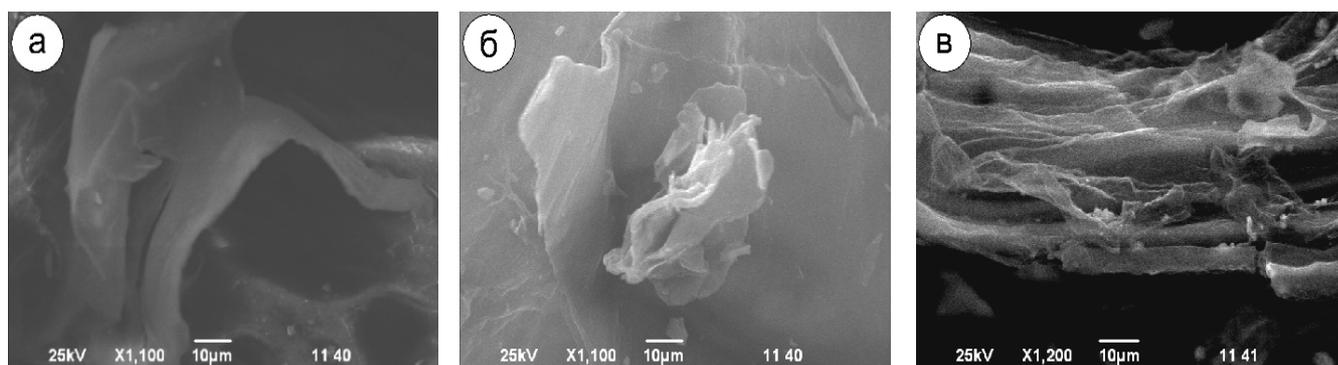


Рис. 2. СЭМ-изображения: а) исходный образец (луковая шелуха); б) карбонизованная луковая шелуха; в) активированная луковая шелуха.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 2(а) показана микроструктура исходного образца ЛШ, 2(б) – карбонизованной ЛШ при температуре 550 °С и 2(в) – активированной при температуре 850 °С в растворе КОН. Активированная ЛШ обладает взаимосвязанной, развитой двумерной структурой. Наблюдается формирование ультратонких нанопластин по сравнению с карбонизованной ЛШ. Морфология GLC-ОН после активации имеет большую специфическую область накопления и превращения зарядов. Различия в морфологии карбонизованных и активированных образцов в основном связаны с эффектом двумерного разделения sp^2 углерода вследствие процесса высокотемпературной активации, что также подтверждается данными Рамановской спектроскопии.

Рентгеновская дифракция активированной луковой шелухи при температуре 850 °С представлена на рисунке 3(а). Рентгенограмма активированного образца ЛШ при температуре 850 °С показывает аморфную природу, при этом наблюдается широкий пик в диапазонах 2θ 40–50°, характерный для отражения чешуек графена (102) [22]. Явных пиков кристалличности в материале не наблюдается.

Рамановская спектроскопия активированного образца ЛШ при температуре 850 °С представлена на рисунке 3(б). Колебательные моды спектра включают полосу G, указывающую на наличие sp^2 -гибридизированных атомов углерода, полосу D, отражающую дефекты, присутствующие в графене, и полосу 2D, указывающую количество слоев графена. Пик D расположен в области 1350–1360 cm^{-1} , G-пик – в области 1570–1590 cm^{-1} и 2D-пик – в районе 2708 cm^{-1} . Таким образом, активированная ЛШ при температуре 850 °С имеет

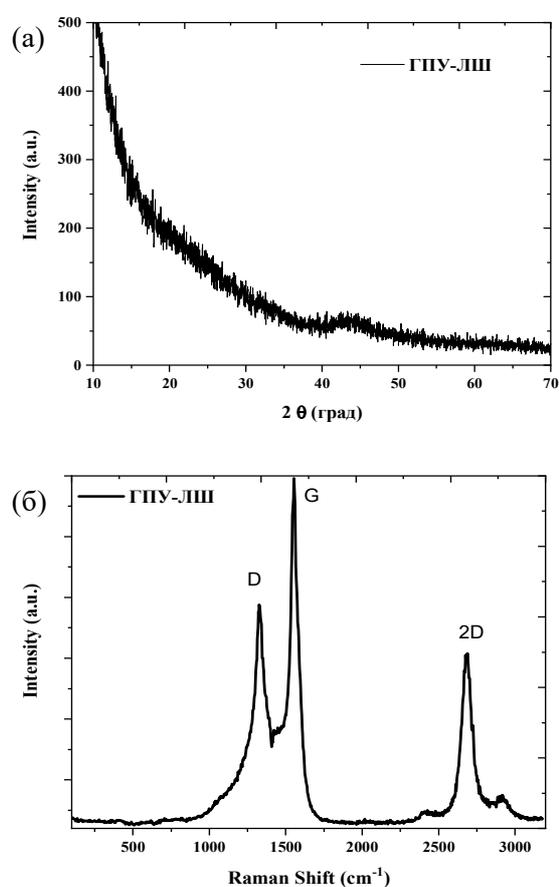


Рис. 3. (а) Рентгеновская дифракция и (б) Рамановская спектроскопия для ГПУ-ЛШ 850 °С.

весьма интенсивные пики D и 2D, что свидетельствует о высокой концентрации дефектов в структуре, а также о наличии многослойного графена. Таким образом, при активации карбонизованной луковой шелухи КОН происходит удаление примесных атомов из кристаллической решетки двумерного углерода путем образования дефектов, формируя при этом однородные высококачественные чешуйки графена [23].

Электрохимические характеристики ГПУ–ЛШ были исследованы посредством изготовления ячейки с двумя электродами. На рисунке 4(а) представлена циклическая вольтамперометрия (ЦВА) ячейки с электродами ГПУ–ЛШ при температуре 850 °С в водном растворе электролита КОН в потенциальном окне 0–1 В при скорости сканирования 20, 40, 80 и 160 мВ/с. Циклическая вольтамперометрия, полученная при всех скоростях развертки, имеет характерную прямоугольную форму в диапазоне измерений от 0 до 1 В, что свидетельствует о том, что образец обладает типичными емкостными свойствами двойного электрического слоя [24].

Метод гальваностатического заряда-разряда был использован для исследования емкости, кулоновской эффективности и сохранения емкости полученных образцов ГПУ–ЛШ. На рисунке 4(б) представлены кривые заряда/разряда при значениях электрического тока 100, 500, 1000 и 2000 мА/г для ячейки с электродами на основе ГПУ–ЛШ. Характер заряда/разряда, который пред-

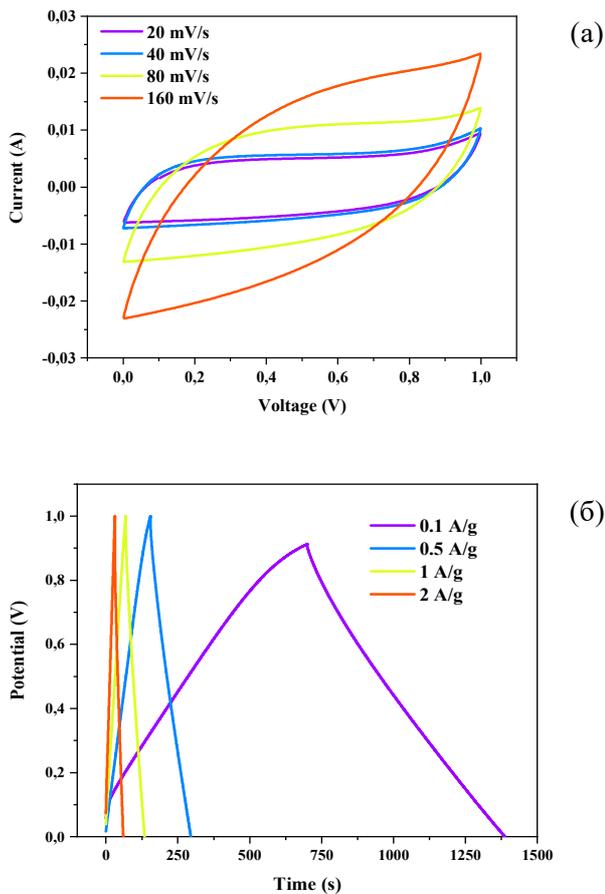


Рис. 4. (а) ЦВА при различных скоростях развертки (20, 40, 80 и 160 мВ/с) для ГПУ–ЛШ при температуре 850 °С с 6 М электролитом КОН (0–1 В), (б) кривые гальваностатического заряда-разряда (GCD) при различной плотности тока.

ставлен в виде асимметричных треугольников, свидетельствует о высоком кулоновском КПД суперконденсаторов, имеющих удельную емкость 94,7% при плотности тока 1000 мА/г. Удельная емкость полученного образца ГПУ–ЛШ при температуре 850 °С составила 137, 140, 130 и 116 Ф/г при 100, 500, 1000 и 2000 мА/г соответственно (рис. 5).

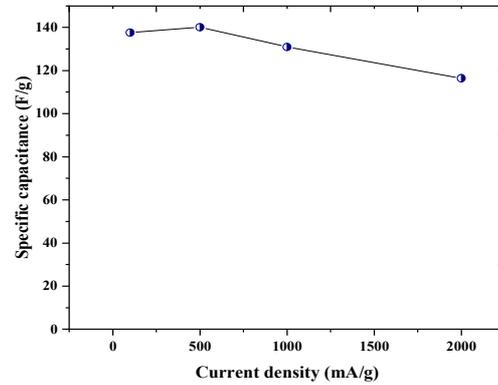


Рис. 5. Удельная емкость при различных плотностях тока.

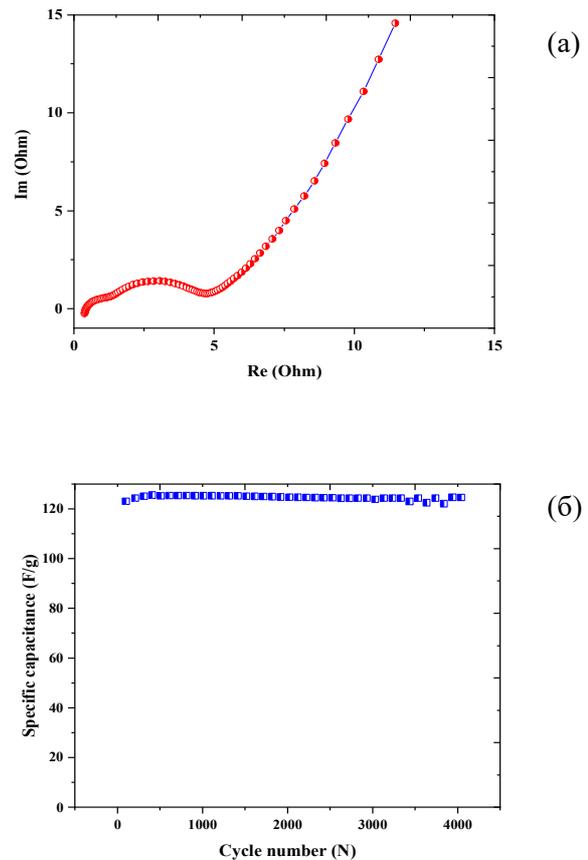


Рис. 6. Электрохимические характеристики электродов на основе ГПУ–ЛШ: (а) кривая EIS, записанная в диапазоне частот от 100 кГц до 10 МГц; (б) зависимость удельной емкости от физического числа циклов при ГЗР при постоянной плотности тока 2000 мА/г.

Измерения импеданс спектров были выполнены для изучения электрохимического отклика системы [31]. График Найквиста, показанный на рисунке ба, демонстрирует расчет сопротивления раствора ($R_s \sim 0,37$ Ом), сопротивление переноса заряда ($R_c \sim 4,28$ Ом), величину эквивалентного последовательного сопротивления ($R_s + R_c \sim 4,65$ Ом) соответственно [25]. В то же время суперконденсатор на основе ГПУ–ЛШ продемонстрировал превосходную циклическую стабильность, сохраняя при этом удельную емкость $\sim 100\%$ после 3300 циклов заряда–разряда в диапазоне потенциалов 0–0,1 В (рисунок бб).

4. Заключение

В результате проведенного исследования было установлено, что графеноподобный углерод, полученный из отходов луковой шелухи с использованием КОН в качестве активирующего реагента, демонстрирует исключительные свойства для применения в электрохимических накопителях энергии. Собранные ячейки с двумя электродами продемонстрировали удельную емкость 130 Ф/г при удельном токе 1 А/г. Важно отметить, что суперконденсатор на основе ГПУ–ЛШ продемонстрировал циклическую стабильность, удерживая удельную емкость на уровне $\sim 100\%$ после 3300 циклов заряда–разряда в диапазоне потенциалов 0–0,1 В. Таким образом, результаты данного исследования подтверждают, что графеноподобный углерод из луковой шелухи является перспективным материалом для создания высокоэффективных суперконденсаторов с отличными электрохимическими характеристиками и долговечностью.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы «Грантовое финансирование научных исследований» АР15473245 Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Список литературы

[1]. Sathyan T.V., Thomas J., Thomas N. Designing of manganese-based oxides and oxyhydroxides as positive electrode materials and activated carbon from *Phyllanthus emblica* as negative electrode material for battery type supercapacitor // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023.

[2]. Prashant D., Vishal S., Priyanka H. Maheshwari, Shashank S. Recent advances in biomass

derived activated carbon electrodes for hybrid electrochemical capacitor applications: Challenges and opportunities // *Carbon*. – 2020. – Vol.170. – P. 5595.

[3]. Amrita R., Saptarshi K., Ghosal R., Kinsuk N., Anil K. Bhowmick. Facile Synthesis and Characterization of Few-Layer Multifunctional Graphene from Sustainable Precursors by Controlled Pyrolysis: Understanding of the Graphitization Pathway, and Its Potential Application in Polymer Nanocomposites // *ACS Omega*. – 2021. – Vol. 60. – P. 7746.

[4]. Gunasekaran S.S., Gopalakrishnan A., Subashchandrabose R., Badhulika S. Single Step, Direct Pyrolysis Assisted Synthesis of Nitrogen-Doped Porous Carbon Nanosheets Derived from Bamboo wood for High Energy Density Asymmetric Supercapacitor // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – Vol. 42. – P. 103048.

[5]. Fu H.H., Chen L., Gao H., Yu X., Hou J., Wang G., Guo X. Walnut shell-derived hierarchical porous carbon with high performances for electrocatalytic hydrogen evolution and symmetry supercapacitors // *International journal of hydrogen energy*. – 2020. – Vol. 45. – P. 1.

[6]. Jayachandran M.S., Kishore B., Maiyalagan T., Rajadurai N., Vijayakumar T. Activated carbon derived from bamboo-leaf with effect of various aqueous electrolytes as electrode material for supercapacitor applications // *Materials Letters* 301. – 2021. – Vol.301. – P.130335.

[7]. He X., Ling P., Yu M., Wang X., Zhang X., Zheng M. Rice husk-derived porous carbons with high capacitance by $ZnCl_2$ activation for supercapacitors // *Electrochimica Acta*. – 2013. – Vol. 105. – P.635-641.

[8]. Song X., Ma X., Li Y., Liang D., Jiang R. Tea waste derived microporous active carbon with enhanced double-layer supercapacitor behaviors // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol.487. – P.189-197.

[9]. Liu Y., Wang X., Jiang X., Li X., Yu L. Shape-controlled synthesis of porous carbons for flexible asymmetric supercapacitors // *Nanoscale* 10. – 2018. – Vol. 10. – P. 22848-22860.

[10]. Zhu Y., Hu H., Li W, Zhang X. Resorcinol-formaldehyde based porous carbon as an electrode material for supercapacitors // *Carbon*. – 2007. – Vol.45. – P.160-165.

[11]. Wang H., Xu Z., Kohandehghan A., Li Z., Cui K., Tan X., Stephenson T.J., King'onde C.K., Holt C.M., Oo Hen B.C., Tak J.K., Harfield D., Anyia A.O., Mitlin D. Interconnected carbon nanosheets derived from hemp for ultrafast supercapacitors with high energy // *ACS Nano*. – 2013. – Vol.7. – P. 5131–5141.

[12]. Ashraf C.M., Anilkumar K.M., Jinisha B., Manoj M., Pradeep V.S., Jayalekshmi S. Acid washed, steam Activated, coconut shell derived carbon

- for high power supercapacitor applications // *J. Electrochem. Soc.* – 2018. – Vol. 165. – P. A900-A909.
- [13]. Liu B., Zhang L., Qi P., Zhu M., Wang G., Ma Y., Guo X., Chen H., Zhang B., Zhao Z., Dai B., Yu F. Nitrogen-Doped banana peel-derived porous carbon foam as binder-free electrode for supercapacitors // *Nanomaterial.* – 2016. – Vol.6. – P.18.
- [14]. Balathanigaimani M.S., Shim W.G., Lee M.J., Kim C., Lee J.W., Moon H. Highly porous electrodes from novel corn grains-based activated carbons for electrical double layer capacitors // *Electrochem. Commun.* – 2008. – Vol.10. – P. 868-871.
- [15]. Dewei W., Shijia L., Guoli F., Guihong G., Jinfu M. From Trash to Treasure: Direct Transformation of Onion Husks into Three-Dimensional Interconnected Porous Carbon Frameworks for High-Performance Supercapacitors in Organic Electrolyte // *Electrochimica Acta.* – 2016. – Vol.216.
- [16]. [16]. Yeleuov M., Daulbayev C., Taurbekov A., Abdisattar A., Ebrahim R., Kumekov S., Prikhodko N., Lesbayev B., Karakozov B. Synthesis of graphene-like porous carbon from biomass for electrochemical energy storage applications // *Diamond & Related Material.* – 2021. – Vol.119. – P.108560.
- [17]. Caturla F., Molina-Sabio M., Rodríguez-Reinoso F. Preparation of activated carbon by chemical activation with $ZnCl_2$ // *Carbon.* – 1991. – Vol.29. – P.999-1007.
- [18]. Gopalakrishnan, A., Badhulika S. From onion skin waste to multi-heteroatom self-doped highly wrinkled porous carbon nanosheets for high-performance supercapacitor device // *Journal of Energy Storage.* – 2021. – Vol.38. – P. 102533.
- [19]. Gao Y., Zhou Y. S., Qian M., He X. N., Redepenning J., Goodman P., Lu Y.F. Chemical activation of carbon nano-onions for high-rate supercapacitor electrodes // *Carbon.* – 2013. – Vol.51. – P. 52-58.
- [20]. Wang Y., Shi Z., Huang Y., Ma Y., Wang C., Chen M., Chen Y. Supercapacitor devices based on graphene material // *The Journal of Physical Chemistry C.* – 2009. – Vol.113(30). – P. 13103-13107.
- [21]. Gopalakrishnan A., Kong C.Y., Badhulika S. Scalable, large-area synthesis of heteroatom-doped few-layer graphene-like microporous carbon nanosheets from biomass for high-capacitance supercapacitors // *New Journal of Chemistry.* – 2019. – Vol.43(3). – P. 1186-1194.
- [22]. Chong H.M., Hinder S.J., Taylor A.C. Graphene nanoplatelet-modified epoxy: effect of aspect ratio and surface functionality on mechanical properties and toughening mechanisms // *J Mater Sci.* – 2016. – Vol.51(19). – P.8764-8790.
- [23]. Zhang L.L., Zhao X.S. *Chem. Soc. Rev.* – 2009. – Vol.38. – P.2520.
- [24]. Fic K, Lota G, Meller M, Frackowiak E. *Energy Environ. Sci.* – 2012. – Vol.5. – P. 5842-5850.
- [25]. Levie de R. On porous electrodes in electrolyte solutions // *IV Electrochim. Acta.* – 1964. – Vol.9. – P.1231-1245.

References

- [1]. Sathyan TV, Thomas J, Thomas N (2023) 29 June. *International Journal of Hydrogen Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.158>
- [2]. Prashant D, Vishal S, Priyanka H. Maheshwari, Shashank S (2020) *Carbon* 170:5595. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.056>
- [3]. Amrita R, Saptarshi K, Ghosal R, Kinsuk N, Anil K (2021) *ACS Omega* 60:7746. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01710>
- [4]. Gunasekaran S.S, Gopalakrishnan A, Subashchandrabose R, Badhulika S (2021) *Journal of Energy Storage* 42:103048. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103048>
- [5]. Fu HH, Chen L, Gao H, Yu X, Hou J, Wang G, Guo X (2020) *International Journal of Hydrogen Energy* 45:1. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.159>
- [6]. Jayachandran MS, Kishore B, Maiyalagan T, Rajadurai N, Vijayakumar T (2021) *Materials Letters* 301:130335. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130335>
- [7]. He X, Ling P, Yu M, Wang X, Zhang X, Zheng M (2013) *Electrochimica Acta* 105:635-641. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.05.050>
- [8]. Song X, Ma X, Li Y, Liang D, Jiang R (2019) *Applied Surface Science* 487:89-197. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.277>
- [9]. Liu Y, Wang X, Jiang X, Li X, Yu L (2018) *Nanoscale* 10: 22848–22860. <https://doi.org/10.1039/C8NR06966B>
- [10]. Zhu Y, Hu H, Li W, Zhang X (2007) *Carbon* 45:160-165. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.07.010>
- [11]. Wang H, Xu Z, Kohandehghan A, Li Z, Cui K, Tan X, Stephenson TJ, King'ondeu CK, Holt CM, OO Hen BC, Tak JK, Harfi eld D, Anyia AO, Mitlin D (2013) *ACS Nano* 7:5131-5141. <https://doi.org/10.1021/nn400731g>
- [12]. Ashraf CM, Anilkumar KM, Jinisha B, Manoj M, Pradeep VS, Jayalekshmi S (2018) *J. Electrochem. Soc.* 165:A900-A909. <https://doi.org/10.1149/2.0491805jes>
- [13]. Liu B, Zhang L, Qi P, Zhu M, Wang G, Ma Y, Guo X, Chen H, Zhang B, Zhao Z, Dai B, Yu F (2016) *Nanomaterial* 6:18. <https://doi.org/10.3390/nano6010018>
- [14]. Balathanigaimani MS, Shim WG, Lee MJ, Kim C, Lee JW, Moon H (2008) *Electrochem. Commun.* 10:868–871. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2008.04.003>

- [15]. Dewei W, Shijia L, Guoli F, Guihong G, Jinfu M (2016) *Electrochimica Acta* 216. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.09.053>
- [16]. Yeleuov M, Daulbayev C, Taurbekov A, Abdissattar A, Ebrahim R, Kumekov S, Prikhodko N, Lesbayev B, Karakozov B (2021) *Diamond & Related Material* 119:108560. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108560>
- [17]. Caturla F, Molina-Sabio M, Rodríguez-Reinoso F (1991) *Carbon* 29:999-1007. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(91\)90179-M](https://doi.org/10.1016/0008-6223(91)90179-M)
- [18]. Gopalakrishnan, A, Badhulika S (2021) *Journal of Energy Storage* 38:102533. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102533>
- [19]. Gao Y, Zhou YS, Qian M, He XN, Redepenning J, Goodman P, Lu Y. F (2013) *Carbon* 51:52-58. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.08.009>
- [20]. Wang Y, Shi Z, Huang Y, Ma Y, Wang C, Chen M, Chen Y (2009) *The Journal of Physical Chemistry C* 113(30):13103-13107. <https://doi.org/10.1021/jp902214f>
- [21]. Gopalakrishnan A, Kong CY, Badhulika S (2019) *New Journal of Chemistry* 43(3):1186-1194. <https://doi.org/10.1039/C8NJ05128C>
- [22]. Chong HM, Hinder SJ, Taylor AC. (2016) *J Mater Sci* 51(19):8764-8790. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0160-9>
- [23]. Zhang LL, Zhao XS (2009) *Chem. Soc. Rev.* 38:2520. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0160-9>
- [24]. Fic K, Lota G, Meller M, Frackowiak E (2012) *Energy Environ. Sci.* 5:5842-5850. <https://doi.org/10.1039/C1EE02262H>
- [25]. Levie de R (1964) *Electrochim. Acta* 9:1231-1245. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(64\)85015-5](https://doi.org/10.1016/0013-4686(64)85015-5)

Пияз қабығынан алынған графен тәріздес көміртегі негізінде энергия жинақтағыштардың электродтық материалдарын жасау

Ә.Н. Дүйсенбек^{1*}, Е.Е. Бейсенова^{1,2}, К. Асқарұлы^{1,2}, Р.Е. Бейсенов³, А.Б. Толынбеков², А.Д. Кұдайбергенов¹, С. Тұрсынтай¹, А.Е. Манханова³

¹Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22, Алматы, Қазақстан

²Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі, 172, Алматы, Қазақстан

³Қазақстан-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі 59, Алматы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Бұл жұмыста энергия жинақтағыштардың электродтық материалдарын жасау үшін прекурсор ретінде пайдаланылған пияз қабығынан гра-

фен тәріздес көміртектің синтезі келтірілген. Графен тәрізді көміртегі пияз қабығынан 550 °С-та алдын-ала карбонизация әдісімен синтезделді, содан кейін 850 °С температурада термохимиялық активация жасалынды. Алынған графен тәрізді көміртегі үлгілерінің құрылымы мен морфологиясы СЭМ, рентгендік-дифракциялық талдау, Раман спектроскопиясы әдістерімен зерттелді. Үлгілердің электрохимиялық және циклдік сипаттамалары Eіns Р-40Х потенциостат-гальваностат көмегімен жүргізілді. 550 °С карбонизациясындағы үлгі бетінің морфологиясы материалдың тән термиялық мәніне ие, ол 850 °С кезінде КОН-да белсендірілгеннен кейін графен тәрізді көміртегі қабыршақтарымен дамыған бетті алуға мүмкіндік береді. Рентгендік дифрактограммада графен тәрізді құрылымдарға тән 2 theta 40–50° аймағындағы кеңейтілген шыңдар көрсетілген. Раман спектроскопиясы көптеген құрылымдық ақаулары бар көп қабатты графеннің түзілуін анықтады. Синтезделген үлгі ұнтағы екі қабатты электрохимиялық конденсаторды құрастыруда белсенді материал ретінде қолданылды. Жиналған конденсатордың электрохимиялық сипаттамасы 130 Ф/г меншікті сыйымдылықтың мәнін және 1000 мА/г гравиметриялық ток тығыздығында 94,7% кулондық тиімділікті көрсетті. Алынған нәтижелер пияз қабығының қалдықтарынан графен тәрізді көміртекті қолдану жоғары жұмыс кернеуі бар суперконденсаторлар үшін қолайлы материал екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: суперконденсаторлар, карбонизация, активация, белсендірілген көмір, электрод, графитизация.

Manufacture of electrode materials for energy storage based on graphene-like carbon produced from onion husk

A. Duisenbek^{1*}, E. Beissenova^{1,2}, K. Askaruly^{1,2}, R.E. Beissenov³, A. Tolynbekov², A. Kudaibergenov¹, S. Tursyntai¹, A. Manhanova³

¹Satbayev University, 22 Satpayev str., Almaty, Kazakhstan

²Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay batyr str., Almaty, Kazakhstan

³Kazakh-British Technical University, 59 Tole bi str., Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This work presents the synthesis of graphene-like

carbon from onion husk used as a precursor for the manufacture of electrode materials for energy storage devices. Graphene-like carbon was synthesized from onion husk (OH) by pre-carbonization at 550 °C and subsequent thermochemical activation in KOH at 850 °C in a stainless-steel reactor. The structure and morphology of the obtained samples of graphene-like carbon were studied by SEM, X-ray diffraction analysis, and Raman spectroscopy. The electrochemical and cyclic CVC characteristics of the samples were carried out using an Elins P-40X potentiostat-galvanostat. The surface morphology of the GLC-OH sample during carbonization at 550 °C has a characteristic thermal stratification of the material, which after activation in KOH at 850 °C, makes it possible to obtain a developed surface with flakes of graphene-like carbon. The X-ray diffraction

pattern shows broadened peaks in the 2 theta 40–50° region, which are characteristic of graphene-like structures. Raman spectroscopy determined the formation of multilayer graphene with a large number of structural defects. The synthesized GLC-OH powder was used as an active material in the assembly of a two-layer electrochemical capacitor. The electrochemical characterization of the assembled capacitor showed a specific capacitance value of 130 F/g and a Coulomb efficiency of 94.7% at a gravimetric current density of 1000 mA/g. The obtained results demonstrate that the use of graphene-like carbon from onion husk waste is a promising material for high-voltage supercapacitors.

Keywords: supercapacitors, carbonization, activation, activated carbon, electrode, graphitization.