

**ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
PHYSICAL SCIENCES
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**

УДК 621.319.4, 661.666.2
МРНТИ 45.35.39

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-186-195>

^{1,2*}**Дүйсенбек Ә.Н.,**

PhD докторант, ORCID ID: 0009-0007-5211-6098,
e-mail: aselka_star@mail.ru

^{1,2}**Бейсенова Е.Е.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0392-6015,
e-mail: mamyrbayeva.e@gmail.com

^{2,3}**Бейсенов Р.Е.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6880-7693,
e-mail: renat7787@mail.ru

^{1,3,4}**Асқарұлы Қ.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8998-0409,
e-mail: k.askaruly@gmail.com

^{2,4}**Приходько Н.Г.,**

PhD, д.х.н., профессор, ORCID ID: 0000-0001-7733-0903,
e-mail: nik99951@mail.ru

⁵**Туганбаев А.Б.,**

главный инженер,
e-mail: tatek.oid@mail.ru

¹КазННТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

²Институт проблем горения, г. Алматы, Казахстан

³Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

⁴Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

⁵Талдыкорганская акционерная транспортно-электросетевая компания,
г. Талдыкорган, Казахстан

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ
С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ
ГРАФЕНОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ОТХОДОВ ЧАЯ**

Аннотация

В данной статье представлены результаты исследования по изготовлению активного материала для электродов суперконденсатора из графеноподобного углерода, полученного из чайных отходов карбони-

заций при температуре 550 °С с последующей термохимической активацией с гидроксидом калия в соотношении 1:4 при температуре 850 °С в кварцевой трубчатой печи. Структура и морфология полученного пористого графеноподобного углерода на основе чайных отходов исследована на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), метода Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ), рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии. Площадь поверхности активированного пористого графеноподобного углерода из чайных отходов составила 2407 м²/г. Электрохимические и вольтамперные характеристики собранного двухслойного суперконденсатора с электродом из ГПУ-ЧО были определены с использованием потенциостат-гальваностата и исследованы на электрохимической рабочей станции Elins P-40X. Полученные результаты показали высокую удельную емкость в 182 Ф/г и кулоновскую эффективность в 96% при плотности тока 2 А/г, также материал продемонстрировал низкое сопротивление переносу заряда, составляющее около 1,5 Ом, что подчеркивает эффективность использования графеноподобного углерода, полученного из отходов чая, демонстрируя его потенциал в качестве многообещающего материала для суперконденсаторов.

Ключевые слова: суперконденсатор, электрод, графеноподобный углерод, активированный уголь, карбонизация, термохимическая активация.

Введение

В современном мире, где технологии стремительно развиваются и возрастает потребность в эффективном хранении энергии, суперконденсаторы становятся перспективным решением для энергетических систем [1–5]. Одним из ключевых компонентов суперконденсаторов являются электроды, исследование и усовершенствование которых направлены на повышение производительности и эффективности устройств. Наиболее широко исследуемыми электродными материалами для суперконденсаторов являются графен и активированный уголь (АУ) [6–10]. Однако несмотря на высокие характеристики графена, его промышленное применение ограничено из-за высокой стоимости и сложности повторного использования тонких графитовых слоев. Использование пористого графеноподобного углерода (ГПУ), полученного из чайных отходов, в качестве базового компонента для электродов суперконденсаторов предоставляет двойные преимущества [11]. ГПУ из чайных отходов обладает значительной удельной поверхностью, что обеспечивает большее количество мест для хранения заряда и способствует высокой удельной емкости. Материал также демонстрирует низкое сопротивление переносу заряда R_{CT} , что улучшает общую электрохимическую производительность суперконденсаторов. Дополнительно использование чайных отходов для производства ГПУ не только снижает стоимость производства, но и способствует устойчивому развитию, сокращая количество бытовых отходов. Таким образом, ГПУ из чайных отходов сочетает в себе высокую эффективность с доступностью сырья, что делает его привлекательным для широкого применения в промышленности. В данной работе представлен синтез графеноподобного углерода из чайных отходов методом активации с использованием КОН, а также проанализированы электрохимические характеристики полученного материала в качестве активного компонента для высокоэффективных суперконденсаторов.

Материалы и методы

Чайные отходы были получены от компании ТОО «RG Brands Казахстан», которая производит чай под торговой маркой «Пиала». Это казахстанский производитель, и город производства – Алматы. Перед синтезом чайные отходы (ЧО) тщательно промывали горячей деионизированной водой, затем сушили в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 8 часов. При карбонизации готовую массу нагревали в кварцевой трубчатой печи при 550 °С в течение 100 минут, прокаливали при 550 °С еще 100 минут, а затем масса остывала до комнатной температуры. При термохимической активации карбонизированную массу смешивают с КОН, который выступает в качестве активирующего агента, в соотношении 1:4. Это соотношение обеспечивает оптимальное развитие пористой структуры, напрямую влияющей на

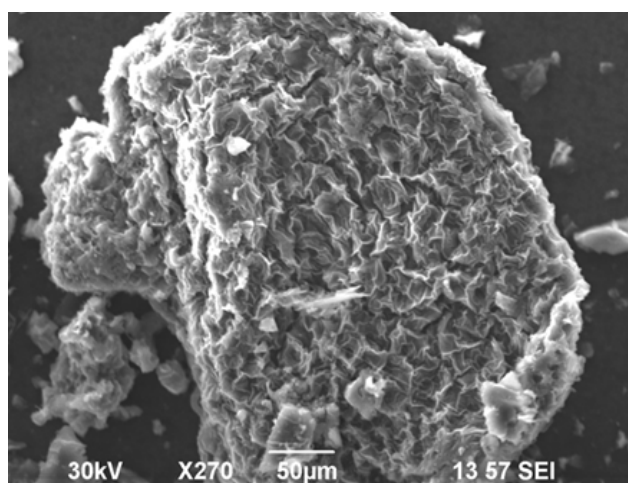
удельную поверхность и электрохимические свойства материала [8]. Готовую перемешанную массу нагревали при 850 °С в течение 120 минут, прокаливали при 850 °С в течение 90 минут и остывала до комнатной температуры. Активированный уголь кипятили в деионизированной воде и промывали 5 раз от соединений калия, значение pH составляло 6. Образовавшийся графеноподобный углерод на основе чайных отходов назвали ГПУ-ЧО. Пористый графеноподобный углерод, полученный из биомассы чая, был подвергнут характеристике при помощи различных методов анализа, включая сканирующую электронную микроскопию (SEM, JEOL JSM-6490 LA), рамановскую спектроскопию (NTEGRA, 473 нм) и рентгеновский дифрактометр X'Pert MPD PRO с использованием источника излучения Cu K α . Эти методы использовались для изучения кристаллической структуры образца ГПУ-ЧО. Удельную поверхность (SSA) измеряли с использованием анализатора СОРБОМЕТР-М по методу БЭТ (Брунауэра – Эммета – Теллера). Перед измерением образцы были дегазированы при температуре 150–300 °С в течение нескольких часов под вакуумом, чтобы удалить адсорбированные вещества. Затем проводилась адсорбция азота при температуре 77 К. Удельная площадь поверхности была рассчитана по уравнению БЭТ на основе изотермы адсорбции в диапазоне давлений от 0,05 до 0,3 P/P₀.

В электрохимических измерениях использовалась двухэлектродная схема, в которой был собран симметричный прототип суперконденсатора. Измерения электрохимических характеристик проводились для электродов, созданных на основе активного материала, испытания выполнялись на электрохимической рабочей станции Elins P-40X. ГПУ-ЧО перемешивали с суспензией, используя N-метил-2-пирролидинон (NMP, Sigma-Aldrich, 99.5%) в качестве растворителя, содержащей 70% ГПУ-ЧО, 10% поливинилфторида (Arkema HSV900, Sigma-Aldrich, 99%) и 20% токопроводящей сажи (TIMICAL SUPER C45, Sigma-Aldrich, 99%). В качестве токоуловителя в 6 М электролите КОН (диапазон напряжений 0–1 В) использовалась титановая фольга (1 см²), а в качестве сепаратора использовалась фильтровальная бумага. Перед нанесением электродного материала титановая фольга обрабатывалась механически с обеих сторон для создания шероховатой поверхности и увеличения адгезии к формирующемуся слою. Нанесенный слой суспензии сушился в вакууме при температуре 120 °С в течение 10 часов. Массовая нагрузка активного материала на электроды составила 0,00395 г. Этот параметр указывает на количество активного вещества, нанесенного на электрод.

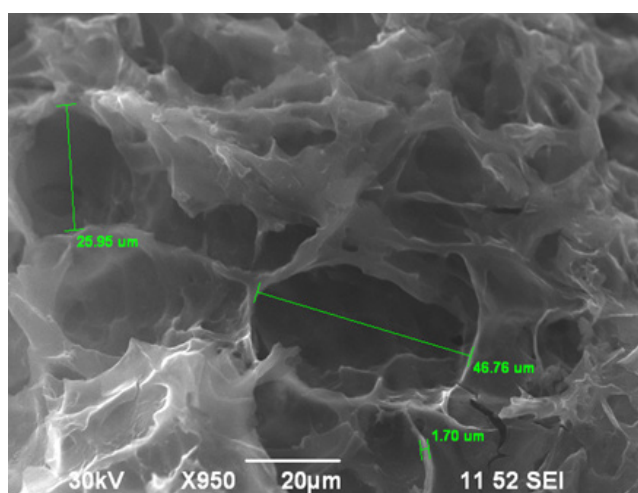
Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны СЭМ-изображения карбонизированного ЧО (а) при 550 °С и активированного ЧО (б) при 850 °С с помощью КОН в качестве активатора [12]. В микроструктуре карбонизированных отходов чая наблюдается образование трехмерного пористого углерода с хорошо развитой поверхностью, характеризующегося каркасом из двумерных углеродных стенок высокой плотности. Пористость карбонизированного образца в расчете на объем материала количество частиц ограничено. Активированные отходы чая, в свою очередь, образуют отчетливую взаимосвязанную структуру и представляют собой хорошо развитый каркас из многослойного графеноподобного углерода.

Рентгеноструктурный анализ для ГПУ-ЧО показывает широкие пики с максимальной интенсивностью 2 тета при 24,26° (002) и 43,81° (101), характерные для графита (рисунок 2). Пиковая интенсивность широкой линии на плоскости (002) для ГПУ-ЧО предполагает наличие аморфного или наноструктурированного углерода [13, 14].



а



б

Рисунок 1 – СЭМ снимки ЧО: а) карбонизованный, б) ГПУ-ЧО

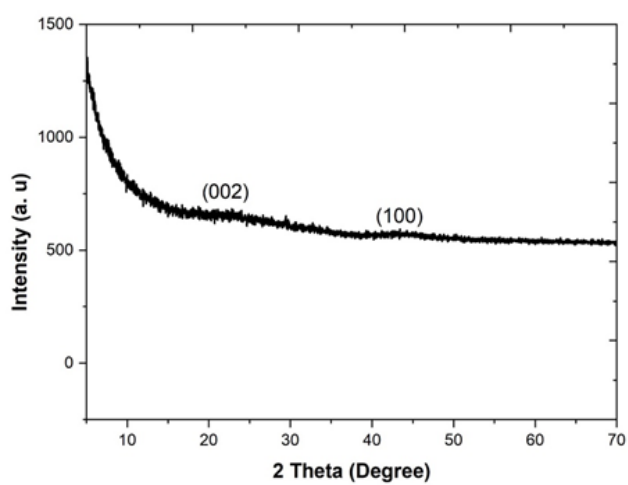


Рисунок 2 – Рентгеноструктурный анализ для ГПУ-ЧО

Результат рамановской спектроскопии для ГПУ-ЧО показан на рисунке 3. Спектр комбинационного рассеяния ГПУ-ЧО показывает стабильное присутствие пика D, расположенного в диапазоне $1355\text{--}1360\text{ см}^{-1}$, и пика G в диапазоне $1580\text{--}1590\text{ см}^{-1}$. Колебательные моды спектра включают полосу G, указывающую на присутствие sp^2 -гибридизированных атомов углерода, с полосой D, отражающей sp^3 или дефекты структуры, обычно нормальные для трехмерного активированного угля, полученного из биомассы [15, 16].

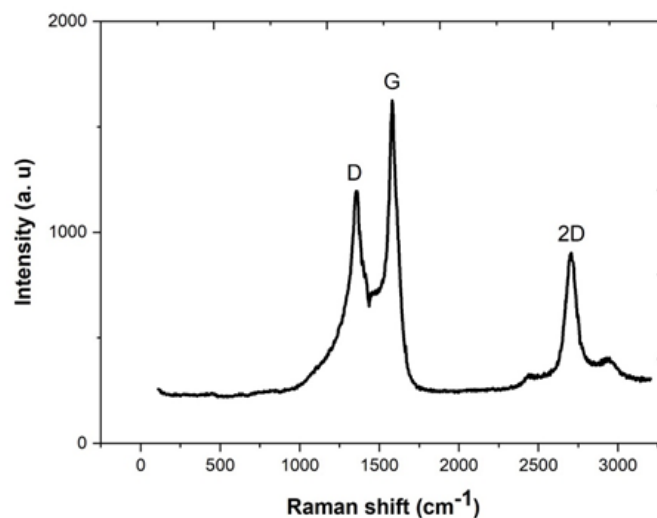


Рисунок 3 – Спектр Рамана для ГПУ-ЧО

Характерной особенностью образца ГПУ-ЧО, прошедшего термическую обработку с КОН, является наличие 2D-пики высокой интенсивности. При карбонизации ЧО при 550 °C биомасса в основном состоит из аморфного углерода sp^3/sp^2 , который после химической активации при 850 °C образует качественные многослой графеноподобного углерода $I_{2D}/I_G=0,55$.

Площадь поверхности активированного ГПУ-ЧО составила $2407\text{ м}^2/\text{г}$, при этом для карбонизованного ЧО составляет $10,41\text{ м}^2/\text{г}$. Эти параметры были определены через адсорбцию газа и анализ методом БЭТ (Брунауэра – Эммета – Теллера). Активация биомассы чайных отходов приводит к улучшению развития поверхности и пористости материала, которые также видны на СЭМ снимках по сравнению с карбонизованными ЧО.

Симметричные суперконденсаторы изготавливаются с использованием 6 М водного раствора КОН в качестве электролита для оценки емкостных свойств материалов. Кривые циклической вольтамперометрии (ЦВА) ГПУ-ЧО имеют более нормативную форму с увеличением скорости сканирования (диапазон потенциалов 0 и 1 В) от 20 мВ до 160 мВ (рисунок 4), демонстрируя довольно хорошее поведение при хранении суперконденсатора с двойным электрическим слоем [17].

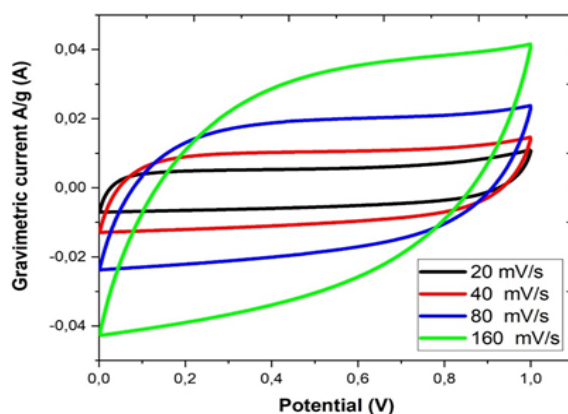


Рисунок 4 – Кривые циклической вольтамперометрии для ГПУ-ЧО

Профили гальваностатического заряда-разряда (ГЗР) ГПУ-ЧО сохраняют типичную симметричную треугольную форму с плотностью тока, варьирующейся от 100 мА/г до 2000 мА/г (рисунок 5), что указывает на хорошую электрохимическую обратимость.

Удельная емкость двухэлектродной системы рассчитывалась из профилей ГЗР с использованием следующего уравнения:

$$C_s = \frac{2 \times I \times t}{m \times \Delta V}$$

где C_s – удельная емкость (Ф/г), I – ток в амперах (А), m – масса активного материала, ΔV – приложенное напряжение и t – время разряда в секундах.

Удельные емкости ГПУ-ЧО составили при плотности тока 0,1; 0,5; 1 и 2 А/г, показали значения 214, 194, 182 и 168 Ф/г соответственно. Полученные ГЗР характеристики демонстрируют высокую кулоновскую эффективность суперконденсатора, что отражается в удельной емкости, достигающей $(t_d/t_c)=96\%$ (t_d – время разряда, t_c – время заряда) при плотности тока 2 А/г. Емкостные характеристики ГПУ-ЧО весьма примечательны по сравнению с различными типами симметричных суперконденсаторов на основе углерода, такими как пористый углерод, легированные азотом (PNHCS) [18], иерархический пористый углерод, полученный из арахисовых отрубей (PB-НТС) [19], полученные из бактериальной целлюлозы взаимосвязанные сети мезо-микропористых углеродных нановолокон (CN-BC) [20], пористый углерод, полученный из биомассы, легированный азотом (NHPC) [21].

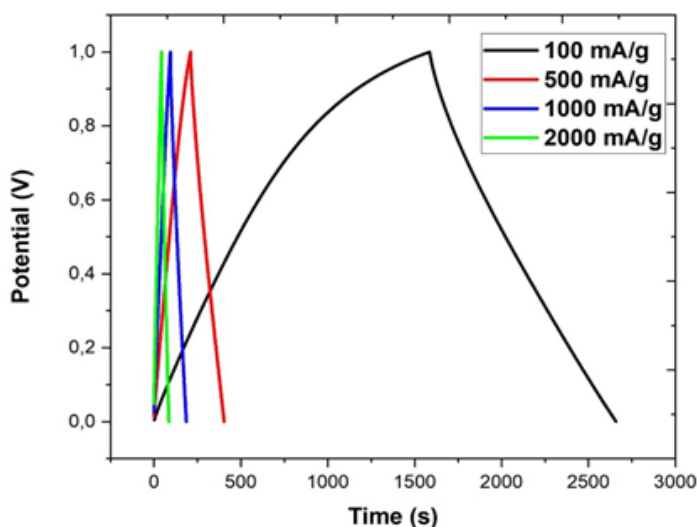


Рисунок 5 – Кривые гальваностатического заряда-разряда для ГПУ-ЧО

Профиль электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) ГПУ-ЧО представлен на рисунке 6. Падение внутреннего сопротивления во время кривой разряда связано с сопротивлением и электропроводностью материала. Сопротивление переноса заряда ($R_{ct} \sim 1,5$ Ом) ГПУ-ЧО меньше, что указывает на повышенную электропроводность и свойства обратимого суперконденсатора [22, 23].

Стабильные характеристики ГПУ-ЧО объясняются не только обильной пористой структурой, но и улучшенной проводимостью, что подтверждается спектрами электрохимического импеданса.

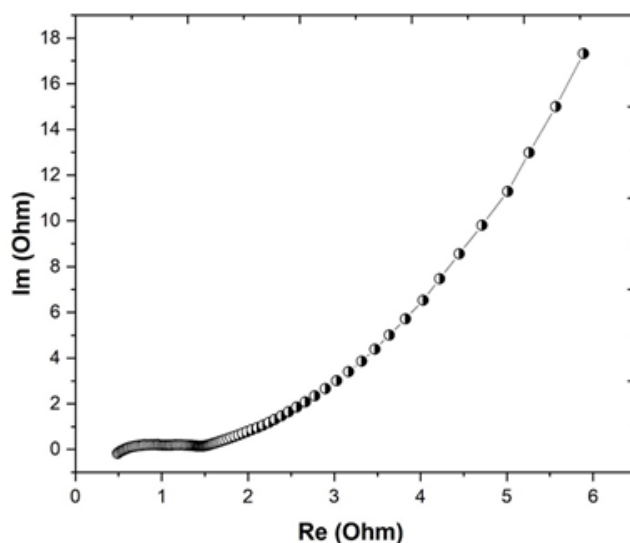


Рисунок 6 – Спектр электрохимического импеданса для ГПУ-ЧО

Заключение

Графеноподобный углерод, полученный из чайных отходов, продемонстрировал выдающиеся характеристики, подтверждающие его потенциал в технологиях хранения энергии. ГПУ-ЧО подвергли физической и химической активации, в результате чего удельная поверхность карбонизированного чайного отхода составила $10 \text{ м}^2/\text{г}$, а для химически активированного угля этот показатель достиг $2407 \text{ м}^2/\text{г}$. Материал также показал низкое сопротивление переносу заряда (R_{CT}) около $1,5 \text{ Ом}$. Суперконденсатор на основе графеноподобного углерода из чайных отходов продемонстрировал емкость 182 Ф/г при плотности тока 1 А/г . Эти улучшенные характеристики связаны с высокотемпературной обработкой КОН, которая способствует развитию микропористой структуры. Результаты подчеркивают важность термохимического синтеза для адаптации углеродных материалов к электрохимическим применениям, открывая новые перспективы для дальнейших исследований.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы «Грантовое финансирование научных исследований» AP15473245 Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

REFERENCES

- 1 Frackowiak E., Abbas Q., Béguin F. Carbon/carbon supercapacitors, *Journal of Energy Chemistry*, 2013, vol. 22, pp. 226–240. [https://doi.org/10.1016/S2095-4956\(13\)60028-5](https://doi.org/10.1016/S2095-4956(13)60028-5).
- 2 Gao Y., Zhou Y.S., Qian M., He X.N., Redepenning J., Goodman P., Li H.M., Jiang L., Lu Y.F. Chemical activation of carbon nano-onions for high-rate supercapacitor electrodes, *Carbon*, 2013, vol. 51, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.08.009>.
- 3 Fu M., Huang J., Feng S., Zhang T., Qian P.-C., Wong W.-Y. One-step solid-state pyrolysis of bio-wastes to synthesize multi-hierarchical porous carbon for ultra-long life supercapacitors, *Mater. Chem. Front.*, 2021, vol. 5, pp. 2320–2327. <https://doi.org/10.1039/D0QM00960A>.
- 4 Tian Q., Wang X., Xu X., Zhang M., Wang L., Zhao X., An Z., Yao H., Gao J. A novel porous carbon material made from wild rice stem and its application in supercapacitors, *Materials Chemistry and Physics*, 2018, vol. 213, pp. 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.026>.

- 5 Laheäär A., Przygocki P., Abbas Q., Béguin F. Appropriate methods for evaluating the efficiency and capacitive behavior of different types of supercapacitors, *Electrochemistry Communications*, 2015, vol. 60, pp. 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2015.07.022>.
- 6 Abbas A., Tabish T.A., Bull S.J., Lim T.M., Phan A.N. High yield synthesis of graphene quantum dots from biomass waste as a highly selective probe for Fe³⁺ sensing, *Sci Rep.*, 2020, vol. 10, 21262. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78070-2>.
- 7 Wang Y., Shi Z., Huang Y., Ma Y., Wang C., Chen M., Chen Y. Supercapacitor Devices Based on Graphene Materials, *J. Phys. Chem.*, 2009, vol. 113, pp. 13103–13107. <https://doi.org/10.1021/jp902214f>.
- 8 Yeleuov M., Daulbayev C., Taurbekov A., Abdisattar A., Ebrahim R., Kumekov S., Prikhodko N., Lesbayev B., Batyrzhan K. Synthesis of graphene-like porous carbon from biomass for electrochemical energy storage applications, *Diamond and Related Materials*, 2021, vol. 119, 108560. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108560>.
- 9 Roy A., Kar S., Ghosal R., Naskar K., Bhowmick A.K. 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. 6, pp. 1809–1822. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03550>.
- 10 Prikhod'ko N.G., Mansurov Z.A., Auelkhankyzy M., Lesbaev B.T., Nazhipkyzy M., Smagulova G.T. Flame synthesis of graphene layers at low pressure, *Russ. J. Phys. Chem.*, 2015, vol. 9, pp. 743–747. <https://doi.org/10.1134/S1990793115050115>.
- 11 Song X., Ma X., Li Y., Ding L., Jiang R. Tea waste derived microporous active carbon with enhanced double-layer supercapacitor behaviors, *Applied Surface Science*, 2019, vol. 487, pp. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.277>.
- 12 Bhoyate S., Ranaweera C.K., Zhang C., Morey T., Hyatt M., Kahol P.K., Ghimire M., Mishra S.R., Gupta R.K. Eco-Friendly and High Performance Supercapacitors for Elevated Temperature Applications Using Recycled Tea Leaves, *Global Challenges*, 2017, vol. 1, 1700063. <https://doi.org/10.1002/gch2.201700063>.
- 13 Adan-Mas A., Alcaraz L., Arévalo-Cid P., López-Gómez Félix. A., Montemor F. Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications, *Waste Management*, 2021, vol. 120, pp. 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.043>.
- 14 Li Y., Li Z., Xing B., Li H., Ma Z., Zhang W., Reubroycharoen P., Wang S. Green conversion of bamboo chips into high-performance phenol adsorbent and supercapacitor electrodes by simultaneous activation and nitrogen doping, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, vol. 155, 105072. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105072>.
- 15 Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects, *Solid State Communications*, 2007, vol. 143, pp. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>.
- 16 Bleu Y., Bourquard F., Loir A., Barnier V., Garrelie F., Donnet C. Raman study of the substrate influence on graphene synthesis using a solid carbon source via rapid thermal annealing, *J Raman Spectrosc*, 2019, vol. 50, pp. 1630–1641. <https://doi.org/10.1002/jrs.5683>.
- 17 He X., Ling P., Yu M., Wang X., Zhang X., Zheng M. Rice husk-derived porous carbons with high capacitance by ZnCl₂ activation for supercapacitors, *Electrochimica Acta*, 2013, vol. 105, pp. 635–641. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.05.050>.
- 18 Han J., Xu G., Ding B., Pan J., Dou H., MacFarlane D.R. Porous nitrogen-doped hollow carbon spheres derived from polyaniline for high performance supercapacitors, *J. Mater. Chem. A*, 2014, vol. 2, pp. 5352–5357. <https://doi.org/10.1039/C3TA15271E>.
- 19 Kang W., Lin B., Huang G., Zhang C., Yao Y., Hou W., Xu B., Xing B. Peanut bran derived hierarchical porous carbon for supercapacitor, *J Mater Sci: Mater Electron*, 2018, vol. 29, pp. 6361–6368. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8615-1>.
- 20 Hao X., Wang J., Ding B., Wang Y., Chang Z., Dou H., Zhang X. Bacterial-cellulose-derived interconnected meso-microporous carbon nanofiber networks as binder-free electrodes for high-performance supercapacitors, *Journal of Power Sources*, 2017, vol. 352, pp. 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.088>.
- 21 Sun J., Niu J., Liu M., Ji J., Dou M., Wang F. Biomass-derived nitrogen-doped porous carbons with tailored hierarchical porosity and high specific surface area for high energy and power density supercapacitors, *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.220>.

22 Peng C., Yan X., Wang R., Lang J., Ou Y., Xue Q. Promising activated carbons derived from waste tea-leaves and their application in high performance supercapacitors electrodes, *Electrochimica Acta*, 2013, vol. 87, pp. 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.09.082>.

23 Ratnaji T., L. John Kennedy. Hierarchical porous carbon derived from tea waste for energy storage applications: Waste to worth, *Diamond & Related Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108100>.

^{1,2*} **Дүйсенбек Ә.Н.,**

PhD докторант, ORCID ID: 0009-0007-5211-6098,

e-mail: aselka_star@mail.ru

^{1,2} **Бейсенова Е.Е.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0392-6015,

e-mail: mamyrbayeva.e@gmail.com

^{2,3} **Бейсенов Р.Е.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6880-7693,

e-mail: renat7787@mail.ru

^{1,3,4} **Асқарұлы Қ.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8998-0409,

e-mail: k.askaruly@gmail.com

^{2,4} **Приходько Н.Г.,**

PhD, х.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0000-0001-7733-0903,

e-mail: nik99951@mail.ru

⁵ **Туганбаев А.Б.,**

бас инженер,

e-mail: tatek.oid@mail.ru

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Алматы қ., Қазақстан

²Жану мәселелері институты, Алматы қ., Қазақстан

³Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

⁴Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

⁵Талдықорған акционерлік көлік-электр желілері компаниясы, Талдықорған қ., Қазақстан

ШАЙ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН АЛЫНҒАН ГРАФЕН ТӘРІЗДІ КӨМІРТЕК НЕГІЗІНДЕ ЖОҒАРЫ ӨНІМДІ СУПЕРКОНДЕНСАТОР ЭЛЕКТРОДТАРЫН ДАЙЫНДАУ

Аңдатпа

Бұл мақалада шай қалдықтарынан алынған графен тәрізді көміртегінің (ГТК) негізінде суперконденсатор электродтары үшін белсенді материалды алу әдістері мен зерттеу нәтижелері ұсынылған. Белсенді материал 550 °C температурада карбонизацияланып, кейін 850 °C температурада кварц құбырлы пеште калий гидроксиді (КОН) арқылы 1:4 қатынасында термохимиялық белсендіру жүргізілді. Шай қалдықтарына негізделген кеуекті графен тәрізді көміртектің құрылымы мен морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM), Брунауэр-Эммет-Теллер (BET) әдісі, рентгендік дифракция және Раман спектроскопиясы арқылы зерттелді. Белсендірілген кеуекті графен тәрізді көміртектің беттік ауданы 2407 м²/г құрады. Суперконденсатордың электрохимиялық сипаттамалары Elins P-40X электрохимиялық жұмыс станциясында зерттелді. Сынақ нәтижелері материалдың 1 А/г тоқ тығыздығында 182 Ф/г жоғары меншікті сыйымдылыққа және 96% кулондық тиімділікке қол жеткізгенін көрсетті. Сондай-ақ, шамамен 1,5 Ом заряд тасымалдау кедергісі тіркелді, бұл материалдың электрод ретіндегі әлеуетін айқындай түседі. Бұл зерттеудің нәтижелері шай қалдықтарынан алынған графен тәрізді көміртекті суперконденсаторлар үшін перспективалық материал ретінде пайдаланудың жоғары тиімділігін дәлелдейді және қалдықтарды пайдалы бағытта өңдеу мүмкіндіктерін көрсетеді.

Тірек сөздер: суперконденсатор, электрод, графен тәрізді көміртек, белсендірілген көмір, карбонизация, термохимиялық активация.

^{1,2*}**Duisenbek A.N.,**

PhD student, ORCID ID: 0009-0007-5211-6098,
e-mail: aselka_star@mail.ru

^{1,2}**Beissenova E.E.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0392-6015,
e-mail: mamyrbayeva.e@gmail.com

^{2,3}**Beissenov R.E.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6880-7693,
e-mail: renat7787@mail.ru

^{1,2,4}**Askaruly K.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8998-0409,
e-mail: k.askaruly@gmail.com

^{2,4}**Prikhodko N.G.,**

PhD, Doctor of Chemical Sciences, Professor, ORCID ID: 0000-0001-7733-0903,
e-mail: nik99951@mail.ru

⁵**Tuganbaev A.B.,**

main engineer,
e-mail: tatek.oid@mail.ru

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

⁴G. Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Almaty, Kazakhstan

⁵«Taldykorgan Joint-Stock Transport Electric Network Company», Taldykorgan, Kazakhstan

PRODUCTION OF HIGH-PERFORMANCE SUPERCAPACITOR ELECTRODES BASED ON GRAPHENE-LIKE CARBON OBTAINED FROM TEA WASTE

Abstract

This article presents the results of a study on the production of active material for supercapacitor electrodes from graphene-like carbon obtained from tea waste, carbonization at a temperature of 550°C, followed by thermochemical activation using potassium hydroxide in a ratio of 1:4 at a temperature of 850°C in a quartz tube furnace. The structure and morphology of the resulting porous graphene-like carbon based on tea waste were investigated using scanning electron microscopy (SEM), Brunauer-Emmett-Teller (BET), X-ray diffraction, and Raman spectroscopy. The surface area of activated porous graphene-like carbon from tea waste was 2407 m²/g. Electrochemical characterization of the assembled supercapacitor using GLC-TW was performed on an Elins P-40X electrochemical workstation and showed high specific capacitance values of 182 F/g, as well as a Coulombic efficiency of 96% at a current density of 1 A/g and the material also demonstrated a low charge transfer resistance of about 1.5 Ohms. These results highlight the effectiveness of using graphene-like carbon derived from tea waste, demonstrating its potential as a promising material for supercapacitors.

Key words: supercapacitor, electrode, graphene-like carbon, activated carbon, carbonization, thermochemical activation.

Дата поступления: 31.08.2024