

## Изготовление электродов на основе пористого графеноподобного углерода из биомассы для суперконденсаторов с высокой производительностью

Э.Н. Дүйсенбек<sup>1,3\*</sup>, Е.Е. Бейсенова<sup>1,3</sup>, Қ. Асқарұлы<sup>1,3,4</sup>, Р.Е. Бейсенов<sup>2,3</sup>,  
А.Д. Кұдайбергенов<sup>1,3</sup>, С. Тұрсынтай<sup>1,3</sup>, Н.Г. Приходько<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>4</sup>Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, ул. Байтурсынова, 126/1, Алматы, Казахстан

### АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты применения пористого графеноподобного углерода из кофейных отходов в качестве активного материала электродов суперконденсаторов. Графеноподобный углерод (ГПУ) был получен путем карбонизации кофейных отходов (КО) при 550 °С с последующей термохимической активацией с КОН в соотношении 1:4 при температуре 850 °С. Структура и морфология полученного ГПУ-КО исследована методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ), а также Рамановской спектроскопии. Полученный ГПУ-КО был использован в качестве активного материала при сборке электродов для двухслойного электрохимического суперконденсатора. Измерения вольтамперных и электрохимических характеристик суперконденсаторов проводили на потенциостате-гальваностате. СЭМ-снимки карбонизованного ГПУ-КО показали развитую трехмерную микро- и мезопористую структуру. Термохимическая активация карбонизованного ГПУ-КО с КОН привела к образованию трехмерного каркаса из графеноподобного углерода с удельной поверхностью 2136 м<sup>2</sup>/г. Рамановские спектры ГПУ-КО определили наличие D и G колебательных мод углерода, а также наличие пика 2D, характерного для многослойного графена с многочисленными структурными дефектами. Электрохимические характеристики собранного суперконденсатора соответствуют следующим значениям: удельная емкость – 223 Ф/г при плотности тока 0,5 А/г, циклическая стабильность с сохранением емкости – не менее 95 % после 5000 циклов. Полученные результаты демонстрируют эффективность применения полученного пористого ГПУ-КО в качестве активного материала электродов в суперконденсаторах с высоким рабочим напряжением.

*Ключевые слова:* биомасса, электрод, графеноподобный углерод, суперконденсатор, карбонизация, активация, графен

### 1. Введение

Чрезмерное потребление ископаемого топлива приводит к увеличению загрязнения окружающей среды и нежелательному изменению климата. Развитие возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, энергия ветра и приливов, ограничено их стабильностью, в то же время требуются эффективные источники хранения энергии. Суперконденсаторы считаются идеальными источниками накопления энергии и широко применяются в портативной электронике, электромобилях, военной и аэрокосмической промышленности [1-2]. Следующее поколение

суперконденсаторов требует применения новых активных материалов с высокими теоретическими емкостями, способных работать при высоких плотностях тока.

В последние годы углеродные материалы, получаемые из биомассы, привлекают большое внимание для изготовления электродов суперконденсаторов, поскольку они являются легкодоступными, многочисленными и экологически безопасными, а также могут быть эффективно преобразованы в различные пористые структуры для устройств хранения энергии [3]. Отходы кукурузной соломы [4], кофейной гущи [5], скорлупы кокосовых орехов [6], бамбуковых палочек [7] и другие отходы биомассы могут быть использованы в каче-

стве прекурсоров. Среди различных углеродных материалов графеноподобный углерод считается очевидным кандидатом для создания высокоэффективных электродов суперконденсаторов благодаря высокой удельной поверхности, низкой стоимости, экологичности и высокой электропроводности [8-10].

В данной работе сообщается о синтезе графеноподобного углерода из кофейных отходов методом активации с помощью КОН. Кофе – это природный биоотход с высоким содержанием углерода, который может быть переработан с получением графеноподобных структур с высокой активной площадью поверхности. Уникальная микроструктура благоприятна для накопления большого количества носителей заряда на границе раздела электродов. Кроме того, проверены электрохимические характеристики образца ГПУ-КО в качестве активного материала для электродов высокоэффективных суперконденсаторов. Исследованы микроструктура, текстура, морфология и электрохимические свойства образца ГПУ-КО.

## 2. Экспериментальная часть

Кофейные отходы были получены из кофе сорта бразильской арабики на местном производственном предприятии в городе Алматы, которые промывали горячей дистиллированной водой для удаления примесей и пыли, затем сушили в сушильном шкафу при температуре 130 °С в течение 7 часов. Процесс получения ГПУ-КО проходит в несколько этапов. Измельченную массу предварительно карбонизировали при 550 °С в течение 100 мин в трубчатой печи при скорости потока газообразного азота (99,99 % ТОО «Ихсан Техногаз») 450 см<sup>3</sup>/мин. Выбор данных условий карбонизации был сделан по причине того, что эти условия, а именно указанные температура и время карбонизации, обеспечивают оптимальный выход желаемых продуктов карбонизации, позволяют получить качественную структуру материала и необходимую степень углеродизации, оптимизировать энергозатраты и стоимость процесса, обеспечивают безопасность для оборудования, удобство обработки материала, управляемость процесса и предотвращение неожиданных реакций. Карбонизованные КО активировали путем смешивания с гидроксидом калия (КОН, ≥85 %, Sigma Aldrich) в массовом соотношении 1:4 и нагревали при 850 °С в течение 90 мин в трубчатой печи. Затем материал промывали горячей дистиллированной водой до достижения нейтрального pH, сушили при 120 °С

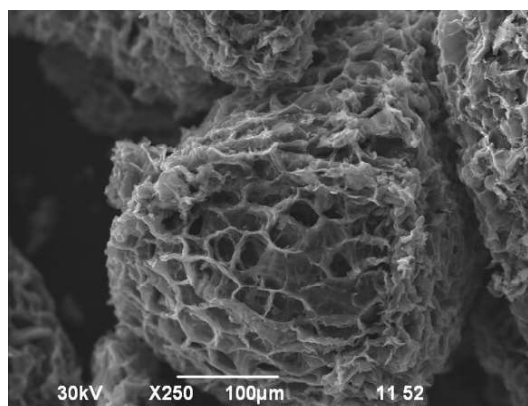
в течение 8 ч в печи и получали графеноподобный пористый углерод на основе кофейных отходов – ГПУ-КО. Удельную поверхность образца ГПУ-КО исследовали на анализаторе СОРБОМЕТР-М (КАТАКОН).

Измерения электрохимических характеристик электродов на основе токосъемника (Ni-Фольга-25у-105) проводили на электрохимической рабочей станции (Elins, P-40X), предел допускаемой приведенной погрешности для диапазонов потенциала составляет ± 0,2 %. При сборке ячейки в двухэлектродной конфигурации применяли водный раствор гидроксида калия (6 М КОН) в качестве электролита, а сепаратором служила фильтровальная бумага. Электродный материал изготавливали из ГПУ-КО, токопроводящей сажи (EQ-Lib-SuperC45, MTI Corporation) и поливинилфторида (ПВДФ, EQ-Lib-PVDF, MTI Corporation) в соотношении 70:20:10. Суспензию готовили путем смешивания 1 г порошка активного материала с 4 мл растворителя N-метил-2-пирролидона (NMP, ≥ 99,0 %, Sigma Aldrich). Перед нанесением электродного материала никелевая фольга подвергали механической обработке обеих сторон с целью создания шероховатой поверхности и увеличения адгезии к формирующемуся слою. Слои суспензии наносили на предварительно подготовленную металлическую фольгу площадью 1 см<sup>2</sup> и далее сушили при 130 °С в течение 10 часов.

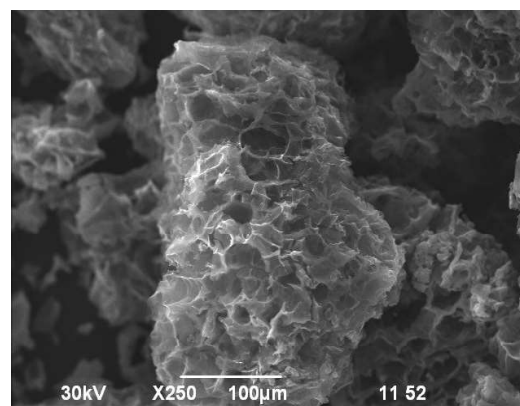
## 3. Результаты и обсуждение

Исследование морфологии и микроструктуры ГПУ-КО проводилось на сканирующем электронном микроскопе. На рис. 1 (а, б) показаны СЭМ-снимки карбонизованных КО при 550 °С и активированных при 850 °С с КОН. Микроструктура карбонизованных и активированных КО преимущественно состоит из 3-мерных пористых квазичастиц, обладающих каркасом из двумерных графеноподобных углеродных структур.

Карбонизованный образец КО (рис. 1(а)) имеет микроструктуру с меньшим количеством открытых пор и мезопор, толщина каркасного слоя в среднем превышает 0,1 мкм. При карбонизации углеродные материалы обладают более плотной однородной структурой поверхности [11]. Более того, неоднородность в исходных материалах при небольших изменениях параметров или условий процесса карбонизации приводит к однообразной морфологии поверхности. В то же время термохимически активированные КО (рис. 1(б)) демонстрируют формирование однородной морфологии поверхности с высокой удельной поверхностью и



(a)



(б)

Рис. 1. СЭМ-изображения: (а) карбонизованные КО; (б) активированные КО.

большой пористостью. Активированные КО обладают развитой, сквозной структурой близкой к мезопористой. Каркас 3-мерной пористой частицы состоит преимущественно из многослойного графеноподобного углерода толщиной меньше 40 нм.

Морфология образца ГПУ-КО соответствует пористому углероду, получаемому активированием КОН, т.е. при химическом воздействии щелочи с поверхностью карбонизированной биомассы [12].

Площадь поверхности термохимически активированного образца ГПУ-КО составила 2136 м<sup>2</sup>/г, а площадь исходных КО – 0,0961 м<sup>2</sup>/г, т.е. площадь поверхности КО увеличилась более чем в 22 000 раза после активации. Результаты активации КО демонстрируют улучшение развития поверхности и пористости материала, которые также видны на СЭМ-снимках по сравнению с карбонизованными КО.

Результаты Рамановской спектроскопии образца ГПУ-КО показаны на рис. 2. Колебательные моды спектра включают полосу G, свидетельствующую о наличии sp<sup>2</sup>-гибридизованных

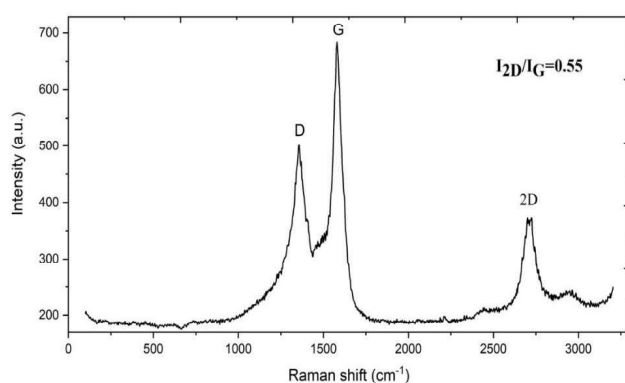


Рис. 2. Рамановский спектр образца ГПУ-КО.

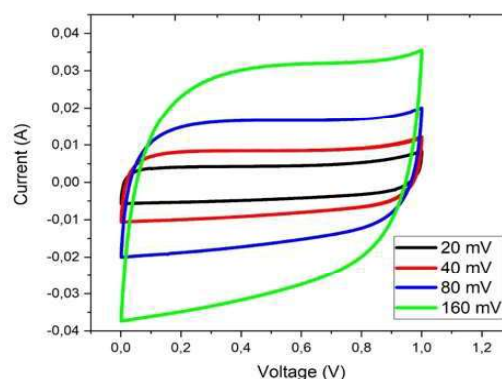


Рис. 3. ЦВА при различных скоростях для ГПУ-КО.

атомов углерода, полосу D, отражающую дефекты, и полосу 2D, указывающую на количество графеновых слоев; пик D расположен в области 1355-1360 см<sup>-1</sup>, пик G – в области 1580-1590 см<sup>-1</sup>, 2D-пик – в области 2710 см<sup>-1</sup>. В образце ГПУ-КО наблюдается 2D-пик гафеноподобного углерода с многослойной структурой. Пик D с высокой интенсивностью характеризует высокую концентрацию дефектов в структуре ГПУ-КО вследствие удаления примесей при высокотемпературной обработке КОН [13].

Электрохимические характеристики образца ГПУ-КО были исследованы методами циклической вольтамперометрии (ЦВА), гальваностатического заряда-разряда (ГЗР) и электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС).

На рис. 3 приведены кривые ЦВА для образца ГПУ-КО, полученные при различных скоростях сканирования (20, 40, 80 и 160 мВс<sup>-1</sup>), а также образец ГПУ-КО характеризовался прямоугольным профилем. В исследованиях ЦВА самая высокая удельная емкость достигается при самой низкой скорости сканирования, а емкость уменьшается с увеличением скорости сканирования.

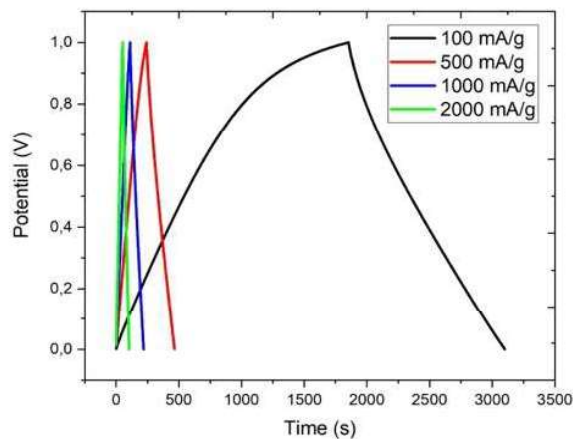


Рис. 4. Кривые ГЗР при различной плотности тока для образца ГПУ-КО.

Измерения емкости, кулоновской эффективности полученного образца ГПУ-КО проведены с использованием метода ГЗР во время этапа разряда. На рис. 4 приведены кривые заряда-разряда для образца ГПУ-КО при значениях тока 0,1, 0,5, 1 и 2 А/г.

Приведенные характеристики заряда-разряда свидетельствуют о том, что суперконденсатор обладает высокой кулоновской эффективностью, его удельная емкость составляет 99 % при плотности тока 1 А/г. КПД по напряжению определяется как отношение напряжения разряда к напряжению заряда системы накопления энергии.

Удельная емкость полученного образца ГПУ-КО составила 249, 223, 214 и 205 Ф/г при 0,1, 0,5, 1 и 2 А/г, соответственно (рис. 5).

Емкостную стабильность образца ГПУ-КО измеряли циклированием ячейки до 5000 циклов при 2 А/г. На рис. 6 показана высокая циклическая стабильность ячейки электрода из ГПУ-КО с сохранением емкости <math><95\%</math> после 5000 циклов заряда-разряда. На рис.7 представлена схема синтеза суперконденсатора на основе графеноподобного углерода из кофейных отходов.

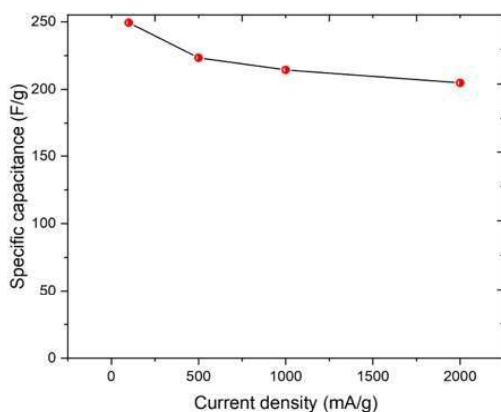


Рис. 5. Удельная емкость при различных плотностях тока.

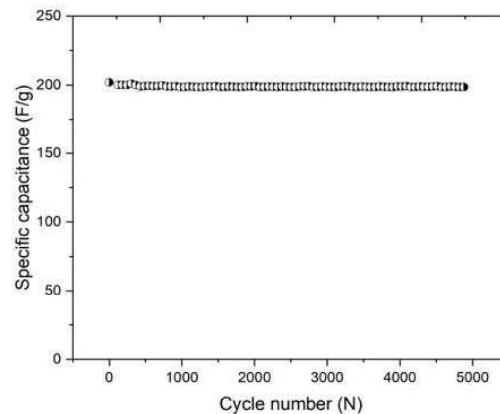


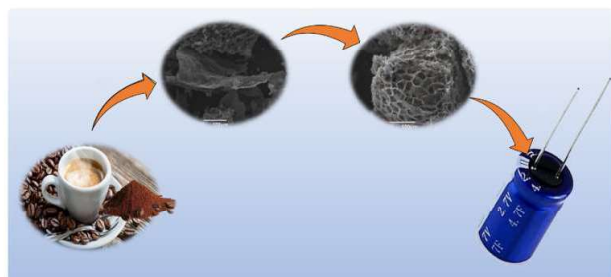
Рис. 6. Зависимость удельной емкости от физического числа циклов гальваностатического заряда-разряда при постоянной плотности тока 2 А/г.

Исследования внутреннего сопротивления проведены при измерении спектроскопии электрохимического импеданса. Внутреннее сопротивление представляет собой значимый параметр, который ограничивает скорость заряда или разряда суперконденсатора. Таким образом, повышенное значение внутреннего сопротивления приводит к снижению мощности суперконденсатора. ЭИС проводили при амплитуде напряжения 5 мВ в диапазоне частот от 100 кГц до 10 мГц. Пересечение ( $R_s \sim 0,4 \text{ Ом}$ ) начала полукруга с действительной осью соответствует собственному сопротивлению активного материала, ионному сопротивлению электролита и контактному сопротивлению границы между электролитом и электродом. Сопротивление переноса заряда ( $R_{ct} \sim 0,8 \text{ Ом}$ ), которое можно оценить по полукругу на графике Найквиста, связано с контактным сопротивлением на границе раздела между материалом электрода и токоотъемником. На рисунке 8 видно, что кривая ЭИС характеризует хорошую электропроводность электрода на основе ГПУ-КО и почти идеальное поведение суперконденсатора [9].

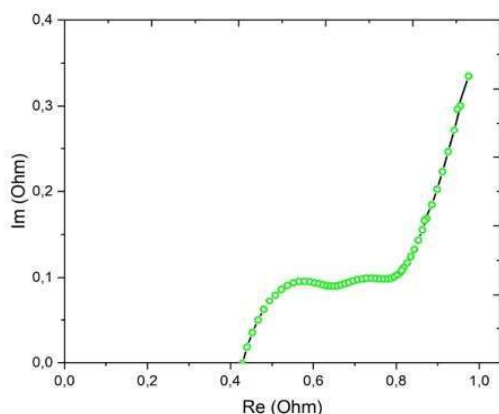
Сравнение результатов удельной емкости активированных пористых углеродных материалов из различных природных отходов показано в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнение активированных пористых углеродных материалов из природных отходов, используемых в качестве активного материала для электродов суперконденсаторов

№	Материал биомассы	Плотность тока, А/г	Удельная емкость, Ф/г	Ссылка
1	Пористый уголь из скорлупы грецкого ореха	0,5	186	[14]
2	Сосновая шишка	0,5	185	[15]
3	Рисовая шелуха	0,5	115	[16]
4	Пористый уголь на основе кокосовой скорлупы	1,0	193	[17]
5	Скорлупа семян пальмового масла	1,0	68	[18]
6	Графеноподобный углерод из кофейных отходов	0,5	223	Настоящая работа



**Рис. 7.** Суперконденсатор на основе графеноподобного углерода из кофейных отходов.



**Рис. 8.** Кривая ЭИС в диапазоне частот от 100 кГц до 10 мГц.

#### 4. Заключение

В работе продемонстрирована возможность получения высокопористых графеноподобных углеродных структур из кофейных отходов путем активации и использования в виде активного материала для электродов в электрохимических конденсаторах. Улучшение характеристик при использовании химически активированных материалов является результатом сочетания высокотемпературной термической обработки с КОН,

способствующей образованию высокопористой морфологии. Уникальная морфология, состоящая преимущественно из графеноподобного углерода, приводит к улучшению взаимодействия электрода и электролита, способствует уменьшению сопротивления, увеличению диапазона активного напряжения, а также стабильности при циклировании.

#### Благодарность

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

#### Список литературы

- [1]. Baxter J., Bian Z.G., Chen, Danielson D., Dresselhaus M.S., Fedorov A.G., Fisher T.S., Jones C.W., Maginn E., Kortshagen U., Manthiram A., Nozik A., Rolison D.R., Sands T., Shi L., Sholl D., Wu Y. Nanoscale design to enable the revolution in renewable energy // *Energy & Environmental Science*. – 2009. – Vol. 2. – P.559-588. |
- [2]. Dubey P., Shrivastav V., Maheshwari P.H., Sundriyal S. Recent advances in biomass derived activated carbon electrodes for hybrid electrochemical capacitor applications: Challenges and opportunities // *Carbon*. – 2020. – Vol. 170. – P.1-29.
- [3]. Lee S.Y., Choi Y., Kim J., Lee J., Bae J.S., Jeong E.D. Biomass-garlic-peel-derived porous carbon framework as a sulfur host for lithium-sulfur batteries // *J. Ind. Eng. Chem.* – 2021. – Vol. 94. – P.272-281.
- [4]. Yu K., Wang J., Wang X., Liang J., Liang C. Sustainable application of biomass by-products: Corn straw-derived porous carbon nanospheres using as anode materials for lithium-ion batteries // *Mater. Chem. Phys.* – 2020. – Vol. 243. – P.122644.

- [5]. Wang C.H., Wen W.C., Hsu H.C., Yao B.Y. High-capacitance KOH-activated nitrogen-containing porous carbon material from waste coffee grounds in supercapacitor // *Adv. Powder Tech.* – 2016. – Vol. 27. – P.1387-1395.
- [6]. 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.900-A909.
- [7]. Zhang X., Zhong Y., Xia X., Xia Y., Wang D., Zhou C., Tang W., Wang X., Wu J.B., Tu J. Metal-Embedded Porous Graphitic Carbon Fibers Fabricated from Bamboo Sticks as a Novel Cathode for Lithium-Sulfur Batteries // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2018. – P.1-30.
- [8]. Wang Y., Shi Z., Huang Y., Ma Y., Wang C., Chen M., Chen Y. Supercapacitor Devices Based on Graphene Materials // *J. Phys. Chem. C.* – 2009. – Vol.113. – P.13103-13107.
- [9]. 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 // *Diam. Relat. Mater.* – 2021. – Vol.119. – P.108560.
- [10]. Lee J., Hwang T., Oh J., Kim J.M., Jeon Y., Piao Y. Sn/SnOx-loaded uniform-sized hollow carbon spheres on graphene nanosheets as an anode for lithium-ion batteries // *J. Alloys Compd.* – 2018. – Vol. 736. – P.42-50.
- [11]. Adan-Mas A., Alcaraz L., Arévalo-Cid P., Félix A., López-Gómez, Montemor F. Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications // *Waste Management.* – 2021. – Vol. 120. – P.280-289.
- [12]. Chiu Y.H., Lin L.Y. Effect of activating agents for producing activated carbon using a facile one-step synthesis with waste coffee grounds for symmetric supercapacitors // *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* – 2019. – Vol. 101. – P.177-185.
- [13]. 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 – P.1630-1641.
- [14]. Yang H., Tang Y., Huang X., Wang L., Zhang Q. Activated porous carbon derived from walnut shells with promising material properties for supercapacitors // *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* – 2017. – Vol. 28 – P.18637-18645.
- [15]. Rajesh M., Manikandan R., Park S., Kim B.C., Cho W., Yu K.H., Raj C.J. Pinecone biomass-derived activated carbon: the potential electrode material for the development of symmetric and asymmetric supercapacitors // *Int. J. Energy Res.* – 2020. – Vol. 44. – P.8591-8605.
- [16]. Sankar S., Lee H., Jung H., Kim A., Ahmed A.T., Inamdar A.I., Kim H., Lee S., Im H., Young K. Ultrathin graphene nanosheets derived from rice husks for sustainable supercapacitor electrodes // *New J. Chem.* – 2017. – Vol. 41. – P.13792-13797.
- [17]. Mi J., Wang X., Fan R., Qu W., Li W. Coconut-Shell-Based Porous Carbons with a Tunable Micro/Mesopore Ratio for High-Performance Supercapacitors // *Energy Fuels.* – 2012. – Vol. 26. – P.5321-5329.
- [18]. Misnon I.I., Zain N.K., Jose R. Conversion of Oil Palm Kernel Shell Biomass to Activated Carbon for Supercapacitor Electrode Application // *Waste Biomass Valorization.* – 2019. – Vol. 10 – P.1731-1740.

## Reference

- [1]. Baxter J, Bian ZG, Chen, Danielson D, Dresselhaus MS, Fedorov AG, Fisher TS, Jones CW, Maginn E, Kortshagen U, Manthiram A, Nozik A, Rolison DR, Sands T, Shi L, Sholl D, Wu Y (2009) *Energy & Environmental Science* 2:559–588. <https://doi.org/10.1039/b821698c>
- [2]. Dubey P, Shrivastav V, Maheshwari PH, Sundriyal S (2020) *Carbon* 170:29. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.056>
- [3]. Lee SY, Choi Y, Kim J, Lee J, Bae JS, Jeong ED (2021) *J. Ind. Eng. Chem* 94:272–281. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.10.046>
- [4]. Yu K, Wang J, Wang X, Liang J, Liang C (2020) *Mater. Chem. Phys.* 243:122644. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122644>
- [5]. Wang CH, Wen WC, Hsu HC, Yao BY (2016) *Adv. Powder Tech.* 27: 1387–1395. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.04.033>
- [6]. Ashraf CM, Anilkumar KM, Jinisha B, Manoj M, Pradeep VS, Jayalekshmi S (2018) *J. Electrochem Soc* 165:900-A909. <https://doi.org/10.1149/2.0491805jes>
- [7]. Zhang X, Zhong Y, Xia X, Xia Y, Wang D, Zhou C, Tang W, Wang X, Wu J.B, Tu J (2018) *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 1-30. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02504>
- [8]. Wang Y, Shi Z, Huang Y, Ma Y, Wang C, Chen M, Chen Y (2009) *J. Phys. Chem. C.* 113:13103–13107. <https://doi.org/10.1021/jp902214f>
- [9]. Yeleuov M, Daulbayev C, Taurbekov A, Abdisattar A, Ebrahim R, Kumekov S, Prikhodko N, Lesbayev B, Batyrzhan K (2021) *Diam. Relat. Mater* 119:108560. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108560>
- [10]. Lee J, Hwang T, Oh J, Kim J.M, Jeon Y, Piao Y (2018) *J. Alloys Compd* 736:42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.127>
- [11]. Adan-Mas A, Alcaraz L, Arévalo-Cid P, Félix A, López-Gómez, Montemor F (2021) *Waste Management* 120:280–289. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.043>

- [12]. Chiu Y.-H, Lin L.-Y, (2019) Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 101:177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.04.050>
- [13]. Bleu Y, Bourquard F, Loir A, Barnier V, Garrelie F, Donnet C (2019) J. Raman Spectrosc 50:1630–1641. <https://doi.org/10.1002/jrs.5683>
- [14]. Yang H, Tang Y, Huang X, Wang L, Zhang Q (2017) J. Mater. Sci. Mater. Electron 28:18637–18645. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7813-6>
- [15]. Rajesh M, Manikandan R, Park S, Kim B. C, Cho W, Yu K. H, Raj C. J (2020) Int. J. Energy Res 44:8591–8605. <https://doi.org/10.1002/er.5548>
- [16]. Sankar S, Lee H, Jung H, Kim A, Ahmed AT, Inamdar AI, Kim H, Lee S, Im H, Young K (2017) New J. Chem 41:13792–13797. <https://doi.org/10.1039/C7NJ03136J>
- [17]. Mi J, Wang X, Fan R, Qu W, Li W (2012) Energy Fuels 26:5321–5329. <https://doi.org/10.1021/ef3009234>
- [18]. Misnon II, Zain NK, Jose R (2019) Waste Biomass Valorization 10:1731–1740. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0196-y>

### Өнімділігі жоғары суперконденсаторлар үшін биомассадан кеуекті графен тәріздес көміртек негізіндегі электродтар жасау

Ә.Н. Дүйсенбек<sup>1,3\*</sup>, Е.Е. Бейсенова<sup>1,3</sup>, Қ. Асқарұлы<sup>1,3,4</sup>, Р.Е. Бейсенов<sup>2,3</sup>, А.Д. Кұдайбергенов<sup>1,3</sup>, С. Тұрсынтай<sup>1,3</sup>, Н. Г. Приходько<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Сатпаев к-сі, 22а, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Қазақстан-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі 59, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі, 172, Алматы, Қазақстан

<sup>4</sup>Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Байтұрсынов көшесі, 126/1, Алматы, Қазақстан

### АНДАТПА

Бұл мақалада энергия сақтау құрылғыларына электрод материалдарының прекурсоры ретінде пайдалану үшін кофе қалдығынан (КҚ) графен тәрізді көміртектің (ГТК) синтезі ұсынылады. Ол сондай-ақ 550 °C температурада алдын ала карбонациялау, содан кейін құбырлы пеште 850 °C температурада КОН термохимиялық белсендіру арқылы синтезделді. Алынған ГТК-КҚ үлгісінің құрылымы мен морфологиясы SEM, BET және Raman спектроскопиясы арқылы зерттелді. Раман спектроскопиялық талдауы көптеген құрылымдық ақаулары бар көп қабатты графеннің түзілуін

растады. Үлгінің вольтметриялық және электрохимиялық сипаттамасы потенциостат-гальваностат көмегімен жүргізілді. Сондай-ақ, ГТК-КҚ Брунауэр-Эммет-Теллер (БЭТ) әдісі бойынша 2136 м<sup>2</sup> г<sup>-1</sup> жоғары меншікті бетінің ауданын көрсетті. Синтезделген ГТК-КҚ екі қабатты электрохимиялық конденсаторды құрастыруда белсенді материал ретінде пайдаланылды. Жиналған конденсаторлардың электрохимиялық сипаттамалары токтың тығыздығы 0,5 А/г кезінде 223 Ф/г сыйымдылықтың меншікті мәнін, сондай-ақ 5000 циклден кейін сыйымдылықты кемінде 95% ұстап тұру кезінде жоғары циклдік тұрақтылықты көрсетті. Алынған нәтижелер кофе қалдықтарынан алынған графен тәрізді көміртегі жоғары вольтты суперконденсаторларды құру үшін сұранысқа ие материал екенін көрсетеді.

*Түйінді сөздер:* биомасса, электрод, графен тәрізді көміртек, суперконденсатор, карбонизация, активация, графен

### Production of electrodes based on porous graphene-like carbon from biomass for supercapacitors with high-performance

A.N. Duisenbek<sup>1,3\*</sup>, E.E. Beissenova<sup>1,3</sup>, K. Askaruly<sup>1,3,4</sup>, R.E. Beissenov<sup>2,3</sup>, A. D. Kudaibergenov<sup>1,3</sup>, S. Tursyntai<sup>1,3</sup>, N.G. Prikhodko<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, 22a Satpayev str., Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazakh-British Technical University, 59 Tole bi str., Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay Batyr Str., Almaty, Kazakhstan

<sup>4</sup>G. Daukeev Almaty University of Energy and Communications, 126/1, Baitursynov str., Almaty, Kazakhstan

### ABSTRACT

This article presents the synthesis of graphene-like carbon (GLC) from coffee waste (CW) for use as a precursor of electrode materials for energy storage devices. It was also synthesized by pre-carbonation at 550 °C and thermochemical activation in KOH at 850 °C in a tube furnace. SEM, BET, and Raman spectroscopy studied the structure and morphology of the resulting GLC-CW sample. Raman spectroscopic analysis confirmed the formation of multilayer graphene with numerous structural defects. Voltammetric and electrochemical characterization of the sample was carried out using a potentiostat-galvanostat. Also, GPU-CW showed a high specific surface area of 2136 м<sup>2</sup> г<sup>-1</sup> according to the Brunauer-

Emmett-Teller (BET) method. The synthesized GLC-CW powder was used as the active material in assembling a double-layer electrochemical capacitor. The electrochemical characteristics of the assembled capacitors showed a specific capacitance value of 223 F/g at a current density of 0.5 A/g, as well as high

cyclic stability with capacity retention of at least 95% after 5000 cycles. The results indicate that graphene-like carbon from coffee waste is a promising material for creating high-voltage supercapacitors.

*Keywords:* biomass, electrode, graphene-like carbon, supercapacitor, carbonization, activation, graphene