

Изготовление эффективного электродного материала для химических накопителей энергии из чайной биомассы методом микроволновой карбонизации и физической активации

Ә.Н. Дүйсенбек^{1,2,3*}, Р.Е. Бейсенов^{2,3}, Қ. Асқарұлы^{1,3}, Е.Е. Бейсенова^{1,3}, А.Д. Кұдайберген^{1,2,3}

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

²Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, Алматы, Казахстан

³Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена получению и исследованию углеродного материала из листовых чайных отходов для применения в системах накопления энергии. Синтез проводился методом микроволновой карбонизации с последующей физической активацией в атмосфере диоксида углерода (CO₂). Для повышения теплопередачи и равномерного нагрева в реакционной зоне в процессе использовался карбид кремния. Полученный активированный углерод характеризуется пористой структурой и хорошей электропроводностью. Структурные и морфологические свойства образцов исследовались с помощью рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии и рамановской спектроскопии. Электрохимические характеристики оценивались методами циклической вольтамперометрии, гальваностатического заряда-разряда и электрохимической импедансной спектроскопии. Образец ФА-30 продемонстрировал высокую удельную емкость (до 152 Ф/г) и отличную стабильность при длительном циклировании, сохранив более 75% начальной емкости после 3000 циклов. Анализ электрохимической импедансной спектроскопии показал низкое последовательное сопротивление (~1 Ом) и минимальное сопротивление переноса заряда, что свидетельствует о быстром прохождении электрохимических процессов и хорошей ионной проводимости в пористой структуре материала. Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале разработанного материала для использования в электродах суперконденсаторов.

Ключевые слова: биомасса, листовый чай, микроволновая карбонизация, физическая активация, электрод, суперконденсатор.

1. Введение

В последние десятилетия стремительный рост потребности в эффективных и устойчивых источниках энергии стимулировал интенсивные исследования в области систем накопления энергии, таких как суперконденсаторы и литий-ионные аккумуляторы [1, 2]. Электродные материалы являются одним из ключевых элементов, определяющих удельную емкость, скорость заряда-разряда, стабильность при циклировании и общую эффективность устройства. Для суперконденсаторов особенно важны высокая удельная по-

верхность, ионная проводимость, стабильность в широком диапазоне потенциалов и устойчивость к многократным циклам. Разработка новых электродных материалов с улучшенными свойствами остается одной из приоритетных задач в области электрохимической энергетики, что стимулирует поиск эффективных подходов к синтезу, в том числе с использованием возобновляемых источников углерода. Особый интерес представляет использование углеродных материалов, обладающих высокой удельной поверхностью, развитой пористой структурой и хорошей электрической проводимостью [3-5]. При этом материалы на основе биомассы выгодно отличаются не только доступностью и экологичностью, но и стабильными физико-химическими свойствами, а также

**Ответственный автор*
E-mail: aselka_star@mail.ru

возможностью целенаправленного управления их пористой структурой и морфологией. Это делает их конкурентоспособными по отношению к традиционным коммерческим активированным углям, особенно в области электрохимических источников энергии.

Одним из перспективных методов получения таких материалов является микроволновая карбонизация, обеспечивающая быструю и энергоэффективную термическую обработку прекурсоров [6, 7]. Ее преимущества включают высокую скорость нагрева, сниженное энергопотребление, равномерное распределение тепла по объему материала и возможность точного контроля условий процесса. Эти характеристики делают метод особенно привлекательным для синтеза углеродных материалов с заданными структурно-морфологическими свойствами. Использование инертной атмосферы, например аргона, позволяет избежать окисления материала и способствует формированию углеродной матрицы с сохранением органических структур. На следующем этапе – активации, проводимой в атмосфере углекислого газа, формируется развитая пористость, обеспечивающая эффективное накопление заряда в электродах суперконденсаторов [8, 9].

В данном исследовании в качестве сырья использовалась биомасса листового чая, обладающая высоким содержанием углерода и природной пористой структурой. Обработка проводилась методом микроволновой карбонизации, который обеспечивает быстрый и равномерный нагрев за счет взаимодействия микроволнового излучения с углеродсодержащими компонентами биомассы. Данный метод отличается высокой энергоэффективностью, сокращением времени синтеза и отсутствием необходимости в использовании агрессивных химических реагентов. В результате получен активированный углерод, пригодный для применения в электрохимических накопителях энергии, благодаря своей стабильной структуре и хорошей электропроводности.

2. Экспериментальная часть

Активированный углеродный материал был получен из биомассы листового чая методом микроволновой обработки. В качестве сырья использовались отходы листового чая, выбранные за их широкую доступность и высокое содержание углеродсодержащих соединений. Сырье предварительно промывалось дистиллированной водой

и сушилось при температуре 120 °С в течение 12 часов. Для повышения эффективности нагрева в процессе микроволновой карбонизации внутрь микроволновой печи помещался тигель, заполненный порошкообразным карбидом кремния (SiC), в который через верхнее технологическое отверстие устанавливался керамический реактор с образцом. SiC равномерно окружал реакционную зону и служил абсорбером микроволнового излучения, благодаря своей высокой способности поглощать электромагнитные волны микроволнового диапазона. Это обеспечивало равномерный нагрев и способствовало более быстрому достижению температуры, необходимой для карбонизации листовых чайных отходов. Карбонизация осуществлялась в микроволновой печи при мощности 800 Вт в течение 60 мин в инертной атмосфере аргона. Экспериментальная установка представлена на рис. 1. Температура в микроволновой печи контролировалась с использованием инфракрасного пирометра, что позволило зафиксировать достижение температуры около 800 °С в рабочей зоне во время карбонизации. После этого карбонизованный материал (К-60) подвергался физической активации в атмосфере диоксида углерода (CO₂) в течение 30 мин. Активация проводилась в той же микроволновой установке с сохранением микроволнового излучения и при непрерывной подаче CO₂, что обеспечивало поддержание температуры около 850 °С. В этих условиях происходила реакция $C + CO_2 \rightarrow 2CO$, способствующая удалению летучих компонентов и формированию развитой пористой структуры. Полученный после активации материал обозначен как ФА-30.

При сборке ячейки в двухэлектродной конфигурации в качестве электролита использовали 6 М раствор KOH и фильтровальную бумагу в роли сепаратора. Электродный состав включал активированный уголь, токопроводящую сажу и поливинилиденфторид в соотношении 70:20:10. Смесь готовили путем диспергирования 1 г порошка в 4 мл N-метил-2-пирролидона. Подготовленную суспензию наносили кистью на площадь 1 см² и сушили при температуре 120 °С в течение 8 часов. Электрохимические свойства образцов оценивали методами циклической вольтамперометрии (ЦВА), гальваностатического заряд-разряда (ГЗР) и электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС). Электрохимические характеристики электродов исследовали с использованием рабочей станции Elins P-40X.



Рис. 1. Экспериментальная установка для микроволнового синтеза активированного угля из биомассы листового чая.

3. Результаты и обсуждение

Для измерения морфологических и структурных характеристик карбонизованного и активированного углерода использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ). Полученные изображения демонстрируют существенные различия в микроструктуре образцов до и после активации. На рис. 2 представлено изображение карбонизованного образца, полученного методом микроволновой карбонизации в атмосфере аргона. Структура материала преимущественно плотная и неравномерная, с отдельными участками расслоения. Поверхность материала выглядит относительно гладкой, пористость выражена слабо, что характерно для материалов без последующей активации. Такая структура указывает на

формирование углеродной матрицы с ограниченным числом микропор.

После активации диоксидом углерода наблюдается значительное изменение морфологии. Поверхность материала становится рыхлой, с хорошо выраженной системой пор различного размера, включая как мезо-, так и макропоры, средний диаметр пор визуальнo оценивается в диапазоне 5–20 мкм. Формирование развитой пористой структуры подтверждает эффективность активации CO_2 , способствующей удалению летучих компонентов и расширению внутренних каналов.

Рентгенофазовый анализ был проведен для оценки кристалличности и структуры углеродного материала, полученного из листовых чайных отходов. На рис. 3а представлена дифрактограмма образца ФА-30, активированного диоксидом углерода после микроволновой карбонизации. Наблюдаются широкие дифракционные пики около $2\theta \approx 23^\circ$ и 43° , соответствующие плоскостям (002) и (100) типичной углеродной структуры. Широкий характер пиков указывает на аморфную или слабоупорядоченную структуру. При этом более выраженный пик (002) свидетельствует о частичной структурной организации углеродных слоев после обработки.

Полученные данные согласуются с результатами СЭМ-анализа, демонстрирующими рыхлую и пористую морфологию, характерную для активированных углеродов растительного происхождения. Таким образом, рентгенофазовый и СЭМ-анализ подтвердили, что в результате микроволновой карбонизации и активации CO_2 формируется аморфный пористый углерод с частичной структурной упорядоченностью.

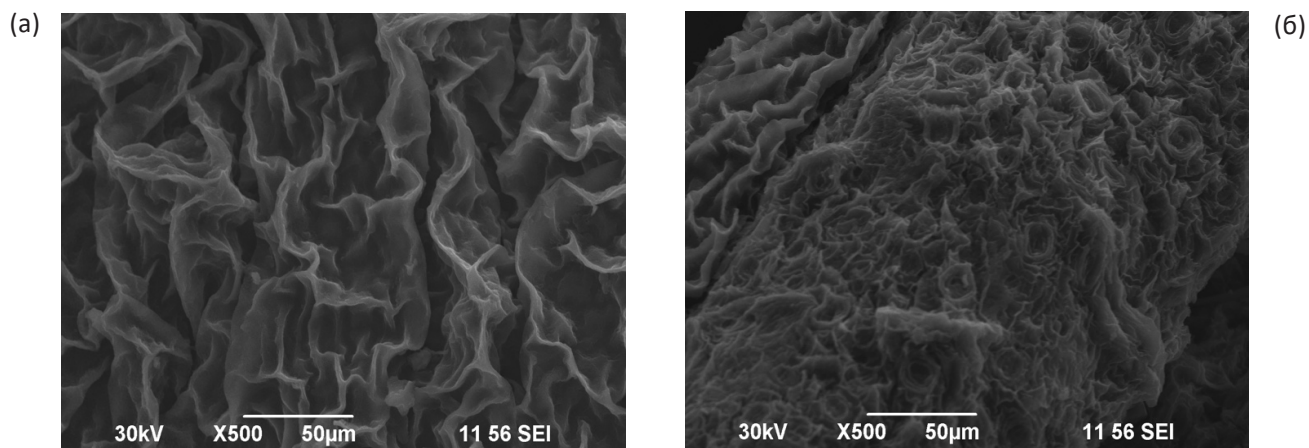


Рис. 2. СЭМ-изображения углеродного материала, полученного из биомассы листового чая: (а) карбонизованный углерод; (б) активированный углерод (после обработки CO_2).

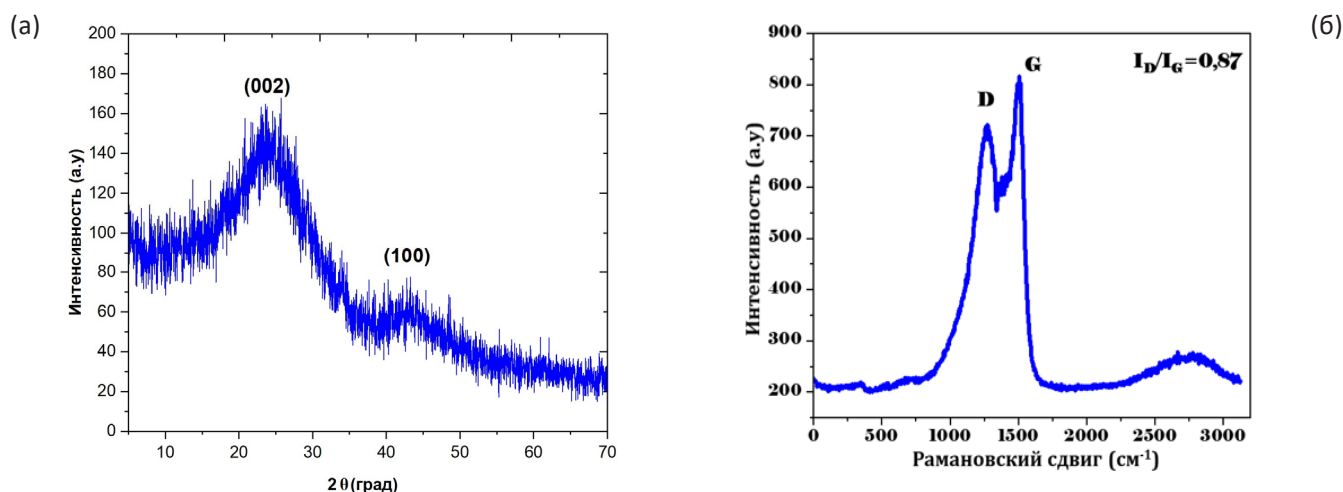


Рис. 3. Дифрактограмма рентгенофазового анализа для образца ФА-30 (а); рамановский спектр углеродного материала ФА-30 (б).

На рис. 3б представлен рамановский спектр углеродного материала ФА-30. В спектре наблюдаются два характерных пика. Пик D ($\sim 1340 \text{ cm}^{-1}$) отражает наличие дефектов и аморфных областей в углеродной структуре. Он связан с нарушением симметрии в sp^2 -упорядоченной решетке и появлением границ, вакансий и функциональных групп. Пик G ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$) связан с колебаниями атомов углерода в плоскостях, где углеродные атомы находятся в состоянии sp^2 -гибридизации, что характерно для графитоподобных структур.

Отношение интенсивностей $I_D/I_G = 0,87$ указывает на умеренную степень дефектности и частичную упорядоченность структуры.

Электрохимические свойства образца ФА-30 были изучены с использованием методов ЦВА, ГЗР и ЭИС. На рис. 4 представлены вольтамперные кривые образца ФА-30, записанные при скоростях сканирования 20, 40, 80 и 160 мВ/с. Согласно результатам ЦВА, максимальная удельная емкость наблюдается при минимальной скорости сканирования; с ее увеличением происходит закономерное снижение емкости, что связано с ограниченным временем для диффузии ионов в пористую структуру материала и неполным участием активных центров в процессе накопления заряда, что согласуется с данными, представленными в работах [10–13].

На рис. 5а представлены заряд-разрядные кривые, полученные при плотностях тока 100, 500, 1000 и 2000 мА/г.

Образец ФА-30 продемонстрировал удельную емкость 152, 127, 116 и 100 Ф/г при плотностях тока 100, 500, 1000 и 2000 мА/г, соответственно, (рис. 5б). Для оценки емкостной стабильности

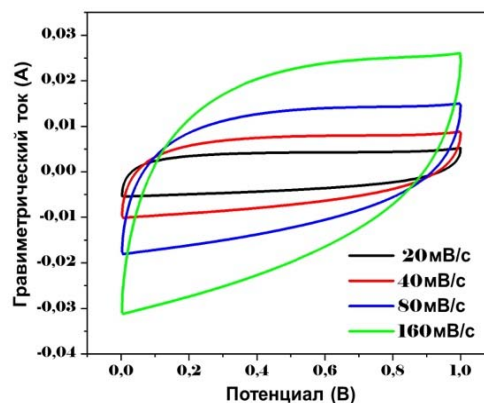


Рис. 4. ЦВА-кривые для образца ФА-30 при скоростях сканирования 20, 40, 80 и 160 мВ/с.

проводилось длительное циклирование ячейки при токе 1 А/г в течение 3000 циклов. Как видно из рисунка 6а, электрод на основе образца ФА-30 сохранил более 75% начальной емкости, что свидетельствует о хорошей стабильности в процессе многократных заряд-разрядных циклов.

На рис. 6б показана кривая ЭИС электрода на основе образца ФА-30. Внутреннее сопротивление является важным параметром, влияющим на скорость процессов зарядки и разрядки суперконденсатора. Его увеличение приводит к снижению выходной мощности устройства. ЭИС была проведена в диапазоне частот от 100 кГц до 10 мГц при амплитуде сигнала 5 мВ аналогично параметрам, применяемым в литературе [14].

Кривая ЭИС демонстрирует типичное емкостное поведение без выраженного полукруга в высокочастотной области. Это значит, что сопротивление переноса заряда (R_{ct}) очень низкое.

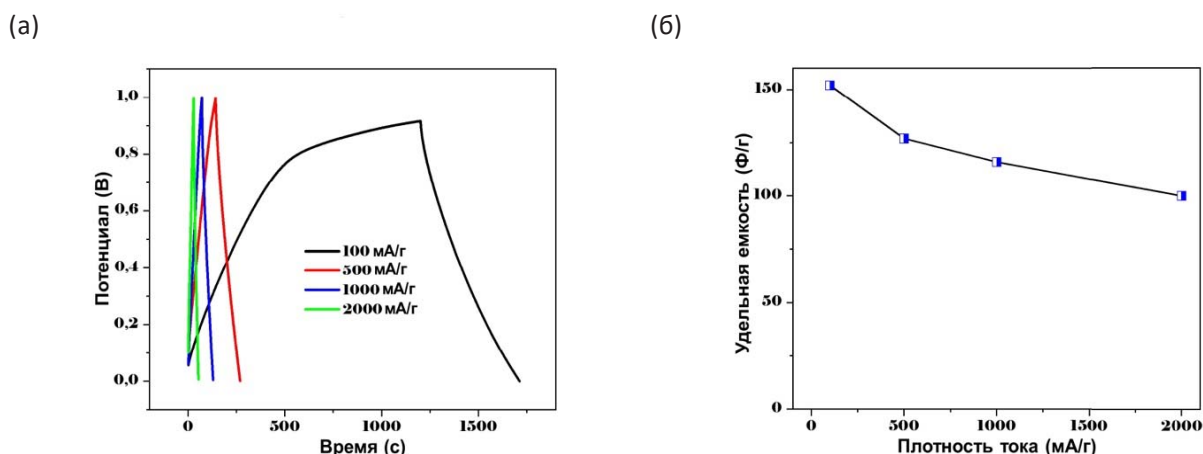


Рис. 5. ГЗР-кривые для образца ФА-30 при плотностях тока 100, 500, 1000 и 2000 мА/г (а); удельная емкость при плотностях тока 100, 500, 1000 и 2000 мА/г (б).

Начальное последовательное сопротивление составляет около 1 Ом. Наклонный участок указывает на диффузионные процессы в пористой структуре, характерные для суперконденсаторных электродов.

В результате морфология материала, представленная на СЭМ-изображениях, демонстрирует пористую структуру с развитой поверхностью, что способствует увеличению активной площади и облегчает диффузию электролита, улучшая тем самым электрохимические характеристики. Расширенное поглощение в видимой области, согласно данным УФ-спектроскопии, связано с сужением ширины запрещенной зоны, что приводит к повышенной фотоэлектрохимической активности материала. Анализ электрохимической импедансной спектроскопии показывает низкое сопротивление переносу заряда, а высокая циклическая стабильность подтверждает устойчивость структуры. Таким образом, полученные структурные и оптические характеристики напря-

мую обуславливают улучшенные электрохимические свойства материала.

4. Заключение

В ходе исследования был получен активированный углерод из листовых чайных отходов методом микроволновой карбонизации с последующей физической активацией в атмосфере диоксида углерода (CO_2). Применение микроволнового нагрева обеспечило быстрый и равномерный термический разогрев, способствующий формированию однородной углеродной матрицы. Проведенные морфологические и структурные исследования подтвердили наличие развитой пористой структуры и аморфной природы материала, что положительно отразилось на его электрохимических характеристиках. Образец ФА-30 продемонстрировал высокую удельную емкость – 152, 127, 116 и 100 Ф/г при плотностях тока 100, 500, 1000 и 2000 мА/г, соответственно.

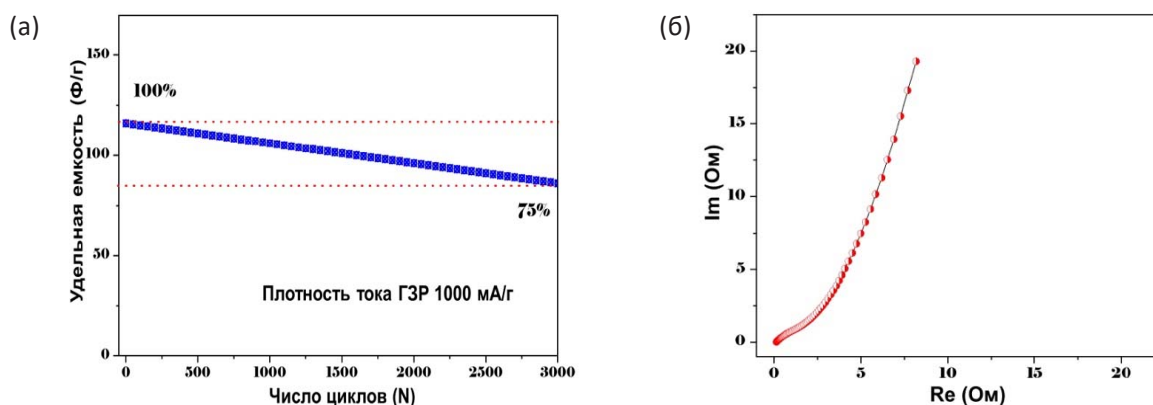


Рис. 6. Стабильность удельной емкости при токе 1 А/г в течение 3000 циклов (а); кривая ЭИС для образца ФА-30 (б).

После 3000 циклов заряд-разряд сохраняется более 75% от начальной емкости, что подтверждает высокую стабильность материала. Электрохимическая импедансная спектроскопия показала низкое внутреннее сопротивление (~1 Ом) и хорошую ионную проводимость. Полученные результаты указывают на высокую перспективность данного материала для применения в качестве электродного материала суперконденсаторов.

Список литературы (ГОСТ)

- [1]. Castro-Gutiérrez J., Celzard A., Fierro V. Energy storage in supercapacitors: focus on tannin-derived carbon electrodes // *Front. Mater.* – 2020. – Vol. 7. – P. 217.
- [2]. Chaluvachar P., Sudhakar Y.N., Mahesha G.T., Nair V.G., Desai N., Pai D.K. Emerging role of graphitic carbon nitride in advanced supercapacitors: a comprehensive review // *J. Energy Chem.* – 2024. – P. 532.
- [3]. 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 // *Glob. Chall.* – 2017. – Vol. 1. – P. 1700063.
- [4]. Beissenov R., Duisenbek A., Beisenova Y., Askaruly K., Yeleuov M., Abdisattar A. Activated biomass-derived 3-dimensional porous graphene-like carbon for high-performance energy storage electrode materials // *Diam. Relat. Mater.* – 2024. – Vol. 149. – P. 111588.
- [5]. Debnath B., Haldar D., Purkait M.K. Potential and sustainable utilization of tea waste: a review on present status and future trends // *J. Environ. Chem. Eng.* – 2021. – Vol. 9. – P. 106179.
- [6]. Ao W., Fu J., Mao X., Wahab N., Ran C., Kang Q., Liu Y., Jiang Z., Dai J., Bi X. Characterization and analysis of activated carbons prepared from furfural residues by microwave-assisted pyrolysis and activation // *Fuel Process. Technol.* – 2021. – Vol. 213. – P. 106640.
- [7]. Foo K.Y., Hameed B.H. Preparation of activated carbon by microwave heating of langsat (*Lansium domesticum*) empty fruit bunch waste // *Bioresour. Technol.* – 2012. – Vol. 116. – P. 522–525.
- [8]. Ahmad A., Gondal M.A., Hassan M., Iqbal R., Ullah S., Alzahrani A.S., Memon W.A., Mabood F., Melhi S. Preparation and characterization of physically activated carbon and its energetic application for all-solid-state supercapacitors: a case study // *ACS Omega.* – 2023. – Vol. 8. – P. 21653–21663.
- [9]. Greco G., Canevesi R.L.S., Di Stasi C., Celzard A., Fierro V., Manyà J.J. Biomass-derived carbons physically activated in one or two steps for CH₄/CO₂ separation // *Renew. Energy.* – 2022. – Vol. 191. – P. 122–133.
- [10]. Duisenbek A., Beisenova Y., Beissenov R., Askaruly K., Yeleuov M., Abdisattar A. Onion husk-derived high surface area graphene-like carbon for supercapacitor electrode material application // *Heliyon.* – 2024. – Vol. 10.
- [11]. 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.
- [12]. Ahmad N., Rinaldi A., Sidoli M., Magnani G., Vezzoni V., Scaravonati S., Pasetti L., Fornasini L., Gupta H., Tamagnone M., Ridi F., Milanese C., Riccò M., Pontiroli D. Pre-treated biomass waste melon peels for high energy density semi solid-state supercapacitors // *J. Power Sources* – 2024. – Vol. 624. – P. 235511.
- [13]. Bandara T.M., Alahakoon A.M., Mellander B.-E., Albinsson I. Activated carbon synthesized from Jack wood biochar for high performing biomass derived composite double layer supercapacitors // *Carbon Trends.* – 2024. – Vol. 15. – P. 100359.
- [14]. Hou J., Jiang K., Wei R., Tahir M., Wu X., Shen M., Wang X., Cao C. Popcorn-derived porous carbon flakes with an ultrahigh specific surface area for superior performance supercapacitors // *ACS Appl. Mater. Interfaces* – 2017. – Vol. 9. – P. 30626–30634. Reference

Reference

- [1]. J. Castro-Gutiérrez, A. Celzard, V. Fierro, Energy storage in supercapacitors: focus on tannin-derived carbon electrodes, *Front. Mater.* 7 (2020) 217. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00217>
- [2]. P. Chaluvachar, Y.N. Sudhakar, G.T. Mahesha, V.G. Nair, N. Desai, D.K. Pai, Emerging role of graphitic carbon nitride in advanced supercapacitors: a comprehensive review, *J. Energy Chem.* (2024) 532. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.11.075>
- [3]. S. Bhoyate, C.K. Ranaweera, C. Zhang, T. Morey, M. Hyatt, P.K. Kahol, M. Ghimire, S.R. Mishra, R.K. Gupta, Eco-friendly and high performance supercapacitors for elevated temperature applications using recycled tea leaves, *Glob. Chall.* 1 (2017) 1700063. <https://doi.org/10.1002/gch2.201700063>

- [4]. R. Beissenov, A. Duisenbek, Y. Beisenova, K. Askaruly, M. Yeleuov, A. Abdisattar, Activated biomass-derived 3-dimensional porous graphene-like carbon for high-performance energy storage electrode materials, *Diam. Relat. Mater.* 149 (2024) 111588. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111588>
- [5]. B. Debnath, D. Haldar, M.K. Purkait, Potential and sustainable utilization of tea waste: A review on present status and future trends, *J. Environ. Chem. Eng.* 9 (2021) 106179. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106179>
- [6]. W. Ao, J. Fu, X. Mao, N. Wahab, C. Ran, Q. Kang, Y. Liu, Z. Jiang, J. Dai, X. Bi, Characterization and analysis of activated carbons prepared from furfural residues by microwave-assisted pyrolysis and activation, *Fuel Process. Technol.* 213 (2021) 106640. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106640>
- [7]. K.Y. Foo, B.H. Hameed, Preparation of activated carbon by microwave heating of langsat (*Lansium domesticum*) empty fruit bunch waste, *Bioresour. Technol.* 116 (2012) 522–525. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.123>
- [8]. A. Ahmad, M.A. Gondal, M. Hassan, R. Iqbal, S. Ullah, A.S. Alzahrani, W.A. Memon, F. Mabood, S. Melhi, Preparation and Characterization of Physically Activated Carbon and Its Energetic Application for All-Solid-State Supercapacitors: A Case Study, *ACS Omega* 8 (2023) 21653–21663. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01065>
- [9]. G. Greco, R.L.S. Canevesi, C. Di Stasi, A. Celzard, V. Fierro, J.J. Manyà, Biomass-derived carbons physically activated in one or two steps for CH₄/CO₂ separation, *Renew. Energy* 191 (2022) 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.035>
- [10]. A. Duisenbek, Y. Beisenova, R. Beissenov, K. Askaruly, M. Yeleuov, A. Abdisattar, Onion husk-derived high surface area graphene-like carbon for supercapacitor electrode material application, *Heliyon* 10 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32915>
- [11]. M. Yeleuov, C. Daulbayev, A. Taurbekov, A. Abdisattar, R. Ebrahim, S. Kumeikov, N. Prikhodko, B. Lesbayev, K. Batyrzhan, Synthesis of graphene-like porous carbon from biomass for electrochemical energy storage applications, *Diam. Relat. Mater.* 119 (2021) 108560. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108560>
- [12]. N. Ahmad, A. Rinaldi, M. Sidoli, G. Magnani, V. Vezzoni, S. Scaravonati, L. Pasetti, L. Fornasini, H. Gupta, M. Tamagnone, F. Ridi, C. Milanese, M. Riccò, D. Pontiroli, Pre-treated biomass waste melon peels for high energy density semi solid-state supercapacitors, *J. Power Sources* 624 (2024) 235511. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235511>
- [13]. T.M. Bandara, A.M. Alahakoon, B.-E. Mellander, I. Albinsson, Activated carbon synthesized from Jack wood biochar for high performing biomass derived composite double layer supercapacitors, *Carbon Trends* 15 (2024) 100359. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100359>
- [14]. J. Hou, K. Jiang, R. Wei, M. Tahir, X. Wu, M. Shen, X. Wang, C. Cao, Popcorn-Derived Porous Carbon Flakes with an Ultrahigh Specific Surface Area for Superior Performance Supercapacitors, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9 (2017) 30626–30634. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b07746>

Шай биомассасын микротолқынды көміртектендіру және физикалық активация әдісімен химиялық энергия жинақтағыштарға арналған тиімді электродтық материал дайындау

**Ә.Н. Дүйсенбек^{1,2,3*}, Р.Е. Бейсенов^{2,3},
Қ. Асқарұлы^{1,3}, Е.Е. Бейсенова^{1,3},
А.Д. Кұдайберген^{1,2,3}**

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Сәтбаев көшесі, 22, Алматы, Қазақстан

²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі 59, Алматы, Қазақстан

³Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі, 172, Алматы, Қазақстан

АҢДАТПА

Бұл жұмыс шай жапырағының қалдықтарынан алынған көміртекті материалды энергияны жинақтау жүйелерінде қолдануға және зерттеуге арналған. Синтез әдісі ретінде CO₂ атмосфера-сындағы физикалық активациямен қатар жүретін микротолқынды көміртектендіру қолданылды. Реакциялық аймақта жылудың біркелкі таралуын қамтамасыз ету үшін қыздыру тиімділігін арттыру мақсатында кремний карбиді пайдаланылды. Алынған белсендірілген көміртек кеуекті құрылымымен және жақсы электр өткізгіштігімен сипатталады. Үлгілердің құрылымдық және морфологиялық қасиеттері рентгенфазалық талдау, сканерлеуші электрондық микроскопия және раман спектроскопиясы әдістерімен зерттелді. Электрохимиялық сипаттамалар циклдік вольтамперометрия, гальваностатикалық заряд-раз-

ряд және электрохимиялық импеданстық спектроскопия әдістерімен бағаланды. ФА-30 үлгісі жоғары меншікті сыйымдылықты (152 Ф/г дейін) және ұзақ мерзімді циклдену кезінде жоғары тұрақтылықты көрсетті – 3000 циклден кейін бастапқы сыйымдылығының 75%-дан астамын сақтап қалды. Электрохимиялық импеданс спектроскопия талдауы материалдың кеуекті құрылымында иондардың жақсы өткізгіштігін және электрохимиялық процестердің жылдам өтуін көрсететін шамамен 1 Ом төмен тізбекті кедергімен заряд тасымалдау кедергісінің өте аз екенін көрсетті. Алынған нәтижелер жасалған материалдың суперконденсаторлар электродтарында қолдану үшін перспективалы екенін дәлелдейді.

Түйінді сөздер: биомасса, жапырақты шай, микротолқынды көміртектендіру, физикалық белсендіру, электрод, суперконденсатор.

Preparation of an efficient electrode material for chemical energy storage devices by microwave carbonization and physical activation of tea biomass

A.N. Duisenbek^{1,2,3*}, R.E. Beissenov^{2,3}, K. Askaruly^{1,3}, E.E. Beissenova^{1,3}, A.D. Kudaibergen^{1,2,3}

¹KazNRTU named after K.I. Satbayev, 22 Satpayev str., Almaty, Kazakhstan

²Kazakh-British Technical University, 59 Tole bi str., Almaty, Kazakhstan

³Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay Batyr Str., Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This work is intended to study and use carbon material obtained from tea leaf waste in energy storage systems. Microwave carbonization accompanied by physical activation in a CO₂ atmosphere was used as a synthesis method. Silicon carbide was used to increase the heating efficiency to ensure uniform heat distribution in the reaction zone. The obtained activated carbon is characterized by a porous structure and good electrical conductivity. The structural and morphological properties of the samples were studied by X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. The electrochemical characteristics were evaluated by cyclic voltammetry, galvanostatic charge-discharge and electrochemical impedance spectroscopy. The ФА-30 sample showed high

specific capacitance (up to 152 F/g) and high stability during long-term cycling - after 3000 cycles it retained more than 75% of the initial capacity. Electrochemical impedance spectroscopy analysis showed that the porous structure of the material has a low series resistance of about 1 Ohm and a very low charge transfer resistance, which indicates good ion conductivity and fast electrochemical processes. The results obtained prove that the prepared material is promising for use in supercapacitor electrodes.

Keywords: biomass, leaf tea, microwave carbonization, physical activation, electrode, supercapacitor.

Сведения об авторах

Ә.Н. Дүйсенбек – докторант кафедры материаловедения, нанотехнологии и инженерной физики КазННТУ им. К.И. Сатпаева
E-mail: aselka_star@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5211-6098>

Р.Е. Бейсенов – PhD, декан Школы химической инженерии, Казахстанско-Британский технический университет
E-mail: r.beissenov@kbtu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-7693>

Қ. Асқарұлы – PhD, КазННТУ им. К.И. Сатпаева
E-mail: k.askaruly@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8998-0409>

Е.Е. Бейсенова – PhD, КазННТУ им. К.И. Сатпаева
E-mail: mamyrbayeva.e@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0392-6015>

А.Д. Құдайберген – докторант кафедры материаловедения, нанотехнологии и инженерной физики КазННТУ им. К.И. Сатпаева
E-mail: kudaibergen.azamat@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1559-6348>