

Получение активированного углерода из отходов биомассы для применения в суперконденсаторах

Назым Маканова^{1,2}, Аяулым Белгибаева^{2,3}, Алия Муканова^{2,3}, Арайлым Нурпейсова^{2,3*}

¹Назарбаев Университет, Астана, Казахстан;
nazym.makanova@nu.edu.kz,

²National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан; ayaulym.belgibayeva@nu.edu.kz,
aliya.mukanova@nu.edu.kz, arailym.nurpeissova@nu.edu.kz

³Институт аккумуляторов, Астана, Казахстан;
ayaulym.belgibayeva@nu.edu.kz, aliya.mukanova@nu.edu.kz,
arailym.nurpeissova@nu.edu.kz

*Корреспонденция: arailym.nurpeissova@nu.edu.kz

Цитирование: Маканова, Н.,
Белгибаева, А., Муканова, А.,
Нурпейсова, А. (2025).
Получение активированного
углерода из отходов биомассы
для применения в
суперконденсаторах. Вестник
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева.
Серия: Химия. География,
153(4), 41-55.
<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2025-153-4-41-55>

Академический редактор:
Э.Е. Копиев

Поступила: 26.09.2025
Исправлена: 08.12.2025
Принята: 09.12.2025
Опубликована: 24.12.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация: Высокий спрос на материалы для сохранения энергии и потребность в устойчивом и экологичном развитии увеличивает внимание ученых к использованию возобновляемых ресурсов и утилизации биоотходов. В этой работе мы использовали косточки фиников как доступный и ежегодно возобновляемый побочный отход пищевой промышленности. Финиковые косточки могут быть использованы как материал для углеродных электродов в суперконденсаторах. Свободностоящие электроды из такого углеродсодержащего материала после специальной обработки показали увеличение циклической стабильности и кулоновской эффективности. Процесс активации при соотношении KOH и биоугля 1:3 позволил получить для двухэлектродной симметричной системы при плотности тока 0,2 А/г, удельную ёмкость 204 Ф/г, плотность энергии 28,3 Втч/кг и удельную мощность равную 205 Вт/кг, что подчеркивает эффективность использования нового углеродсодержащего материала в повышении структурной целостности электродов и улучшении электрохимических свойств системы в целом. Анализ поверхности методом ВЕТ показал увеличение площади поверхности биоугля до 2423,4 м²/г. В этом исследовании внедрение свободностоящих электродов привело к увеличению кулоновской эффективности до 99,97%, что, в свою очередь, позволяет получить высокую производительность суперконденсаторов.

Ключевые слова: суперконденсаторы, углеродный материал, активированный углерод, химическая активация.

1. Введение

Суперконденсаторы привлекли большое внимание ученых благодаря высокой плотности мощности, высокому значению КПД (больше 98%) и принципу работы – электростатическому накоплению заряда на границе электрод-электролит (Huang et al.,

2019; Poonam et al., 2019). За счет такого физического явления заряд и разряд происходит за короткое время, что, в свою очередь, позволяет получать большое количество энергии.

Значительную емкость и удельную мощность совместно определяют структура и удельная площадь поверхности (УПП) используемых электродов. В большинстве случаев используется активированный уголь (АУ), который имеет удельную поверхность больше 1500 м²/г (Béguin et al., 2014; Chen et al., 2017; Zhai et al., 2022). В качестве сырья для АУ могут быть использованы отходы биомассы, такие, как: косточки вишен (Zhang et al., 2020), скорлупа грецкого ореха (Elanthamilan et al., 2021), банановая кожура (Feng and Yang, 2024), рисовая шелуха (Menya et al., 2018), скорлупа кокоса (Hu and Srinivasan, 1999; Sujiono et al., 2022) и другие (Lee et al., 2015; Li et al., 2023). Например, в работе (Li et al., 2023) АУ с удельной площадью 3565 м²/г получен из ели методом химической активации хвои.

Для использования в суперконденсаторах, кроме УПП, немаловажные значения имеют размеры и структура пор. В работе (Supriyeva et al., 2023) установлено, что ультрамикропоры (диаметр < 1 нм) отвечают за емкостные характеристики конденсатора, в то время как мезо- и микропоры ускоряют диффузию и адсорбцию ионов на поверхности углеродного материала (УМ). Создание иерархической пористой структуры, сочетающей высокую удельную поверхность и поры различных размеров, положительно влияет на характеристики суперконденсаторов с двойным электрическим слоем. Оптимизация данных параметров может быть произведена варьированием условий химической или физической активации УМ, (Goskula et al., 2023; Heidarinejad et al., 2020; Said et al., 2023). В химической активации используют кислоты (HNO₃, H₃PO₄) (Sujiono et al., 2022; Yang et al., 2020) и щелочи (NaOH, KOH) (Suresh Kumar Reddy et al., 2015; Wang and Kaskel, 2012). Например, в работе (Yang et al., 2020) использована фосфорная кислота для активации древесины тополя при температуре 450°C, в результате получен УМ с УПП более 2000 м²/г.

Использование щелочей в процессе активации сопровождается рядом технологических трудностей: продукты взаимодействия гидроксидов глубоко проникают в пористую структуру биоугля и требуют длительного промывания для полного удаления, а концентрированные щелочные растворы агрессивно воздействуют на металлические и стеклянные элементы лабораторного оборудования, что усложняет эксплуатацию установки (Suresh Kumar Reddy et al., 2015). Тем не менее именно щелочи участвуют в процессах получения углей с максимальной УПП. Поэтому в нашей работе предложено использование гидроксида калия в качестве активатора, при варировании его соотношения с сырьем и оптимизацией размера пор. Температура активации выбрана 800 °C, поскольку предыдущие работы (Heidarinejad et al., 2020; Sujiono et al., 2022; Yang et al., 2020) показали ее эффективность для активации биосырья. Дополнительно проведена преактивация при температуре 300 °C для улучшения состава сырья (Heidarinejad et al., 2020; Said et al., 2023; Suresh Kumar Reddy et al., 2015; Zhang et al., 2020; Issatayev et al., 2024). Во время преактивации легколетучие вещества в составе сырья, такие, как смолы, масла и остатки гемицеллюлозы, удаляются и остается так называемая «богатая» часть сырья, которая готова для дальнейшей активации. Кроме того, преактивация формирует «углеродный каркас», который является основой для дальнейшего варирования текстуры поверхности. Полученный материал использован для изготовления свободностоящих электродов, которые снизили сопротивление между контактами, что увеличило КПД собранных симметричных ячеек.

Целью настоящего исследования является разработка высокоэффективного активированного УМ из пищевых отходов (финиковых косточек) с контролируемой пористой структурой и функциональными группами на поверхности, а также оценка его электрохимических характеристик в суперконденсаторах с двойным электрическим слоем. Работа направлена на изучение влияния модификации и структуры пор на удельную ёмкость, плотность энергии и стабильность при циклировании.

2. Материалы и методы

Получение АУ проводилось методом химической активации. В качестве активатора использован гидроксид калия (Sigma-Aldrich, безводный, чистота $\geq 99,95\%$). Для активации косточки фиников (сорт Мазафати, г. Бам, Иран) тщательно промыты дистиллированной водой и раздроблены в дробилке (IKA, Германия) для лучшего проинкновения раствора в твердую часть сырья. После раздробленные косточки фиников промыты раствором 1М соляной кислоты (раствор был предварительно разбавлен до рабочей концентрации 1М) (37%, Sigma-Aldrich) в течение 24 часов при перемешивании на магнитной мешалке со скоростью 400 перемешиваний в минуту. Затем косточки промыты горячей дистиллированной водой до нейтрального значения pH и высушены в сушильном шкафу при температуре 100 °C до отсутствия изменения массы. Преактивация проведена в трубчатой печи в атмосфере инертного газа (N₂) для карбонизации и стабилизации химического состава. Полученный УМ (5 г) перемешан с KOH в виде мелкого порошка в соотношении 1:1,5 и 1:3 и залит дистиллированной водой объемом 30 мл. После раствор помещен в ультразвуковую ванну (ELMASONIC P, Германия) на 0,5 часа и перемешан на магнитной мешалке (IKA C-MAG HS 7, Германия) в течение 1 часа. После перемешивания активатора с УМ раствор выдержан в сушильном шкафу при температуре 100 °C до полного испарения жидкости. Застывшая твердая масса прокалена при температуре 800 °C в трубчатой печи в атмосфере азота (скорость подачи азота 30 л/мин). После активации АУ промыт разбавленным раствором HCl ($\approx 5\%$) и горячей дистиллированной водой до pH=7.

Удельные площади поверхности полученных активированных углей измерены методом БЭТ (Autosorb iQ, Anton Paar, США). Перед измерениями около 100 мг образца дегазировано в условиях динамического вакуума при 300°C в течение 24 часов в дегазаторе FloVac (Anton Paar, США). Для исследования морфологии сделаны снимки с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе ZEISS Crossbeam 540 (Carl Zeiss, Германия) при ускоряющем напряжении 5 кВ. Для исследования структуры и наличия дефектов использован рентгенодифракционный анализ (РДА) на дифрактометре SmartLab (Rigaku Co., Япония) с излучением Cu K α ($\lambda = 0,154056$ нм). Дифракционные данные регистрировали в диапазоне 2 θ от 10° до 70° со скоростью сканирования 3°/мин, при работе источника рентгеновского излучения на 40 кВ и 30 мА. Межплоскостные расстояния d_{002} и d_{100} вычисляли по значениям 2 θ для плоскостей (002) и (100) с использованием уравнения Брегга ($2d \sin \theta = n\lambda$). Молекулярные состояния АУ исследованы Рамановской спектроскопией на приборе LabRam HR Evolution (Horiba, Франция). Образец размещали на стеклянной пластине, спектры КРС получали с применением вертикального объектива 10x в конфигурации обратного рассеяния под углом 180°. Для анализа диапазона 1100–1800 см⁻¹ использовался лазер с длиной волны 532 нм.

Для сборки симметричных ячеек рабочие электроды приготовлены в виде свободностоящих электродов. Для этой цели полученный АУ смешан с проводящей добавкой ацетиленовой сажи (MTI Corp., Китай) и связующим политетрафторэтиленом/тэфлон (CAS: 9002-84-0, 60% дисперсия в воде, Sigma-Aldrich) в соотношении 90:5:5, соответственно. Затем в смесь добавлено 10 мл изопропанола, после чего её перемешивали на магнитной мешалке (200 rpm) при температуре 60°C в течение 12–14 часов. Полученная масса равномерно раскатана (Hohsen corp., Япония) до толщины 200-300 мкм, затем высушена в вакуумной печи (DZF-6050, Китай) при температуре 80°C. После сушки из материала вырезаны электроды диаметром 8 мм и толщиной 100 мкм \pm 10 мкм (Hohsen corp., Япония) для дальнейшего использования в качестве электродов в ячейках.

В работе использованы ячейки Swagelok (Kintek, Китай) с двумя отверстиями, сделанные из тefлона, токоприемниками выступали стержни из нержавеющей стали (316 L) диаметром 10 мм и сепаратор из стеклянного микроволокна (Whatman GF/C, в свободно стоящем виде толщина составляет - 260 мкм, диаметр - 10 мм). Ячейки представляют собой сепаратор между двумя идентичными электродами из АУ, каждый массой 2,0 \pm 0,5 мг. Перед сборкой ячеек

свободностоящие электроды пропитывали электролитом (6М КОН) под вакуумом в течение 5 минут.

Циклическая вольтамперометрия (ЦВА) и гальваностатическое циклирование проведены в диапазоне потенциалов от 0,01 до 1,0 В с использованием потенциостата/гальваностата BioLogic SP-240 (BioLogic, Франция). Измерения электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) с синусоидальным сигналом 5 мВ/с в диапазоне частот от 1 мГц до 100 кГц проведены также на потенциостате. В качестве электролита использовали 6М раствор КОН. Для достоверности анализа эксперименты проводились в троекратном повторении.

3. Результаты

3.1 Исследования полученных АУ

СЭМ-снимки (Рисунок 1) демонстрируют высокую пористость АУ. Образование большого количества пор подтверждает успешную активацию, что благоприятно сказывается на работе суперконденсаторов. Снимки СЭМ показывают, что получена целостная пористая структура по всей поверхности обоих образцов. Данные результаты хорошо сопоставимы с ранее полученными результатами (Issatayev et al., 2024; Said et al., 2023; Wang and Kaskel, 2012; Yang et al., 2020).

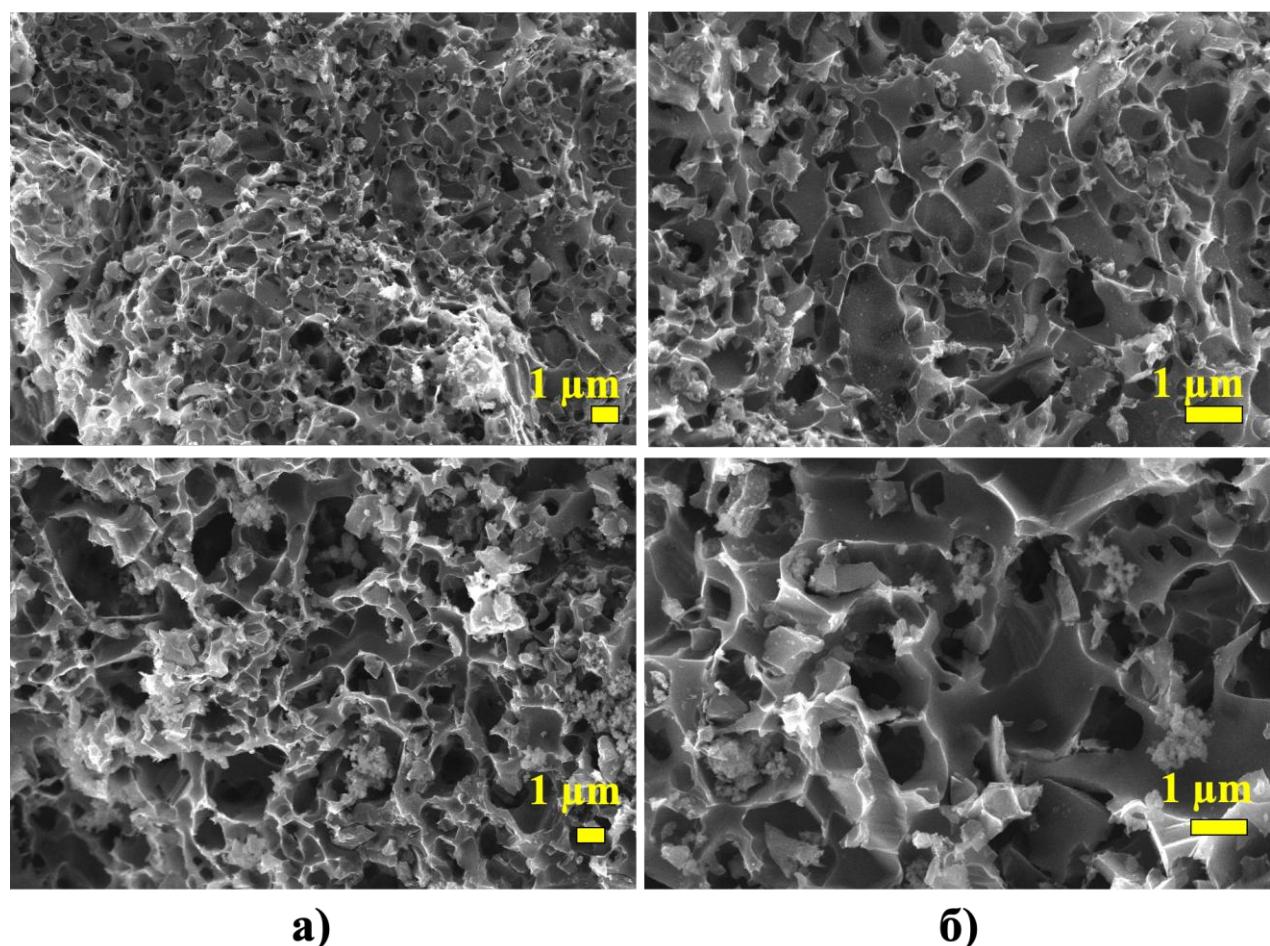


Рисунок 1. Снимки СЭМ АУ активированного в соотношении 1:1.5 (а) и 1:3 (б).

Анализ удельной поверхности по методу БЭТ проведен с использованием физической адсорбции азота при температуре -196°C на приборе Quantachrome Quadrasorb SI (Anton Paar, США). Удельная поверхность рассчитана по многоточечному методу БЭТ в диапазоне

относительного давления $P/P_0 = 0,1\text{--}0,3$, объём пор при $P/P_0 = 0,9$. Распределение по размерам пор оценивалось с использованием теории плотности закалённого твёрдого тела (QSDFT) для щелевых и цилиндрических пор (Neimark et al., 2009; Ravikovitch & Neimark, 2006) (Рисунок 2).

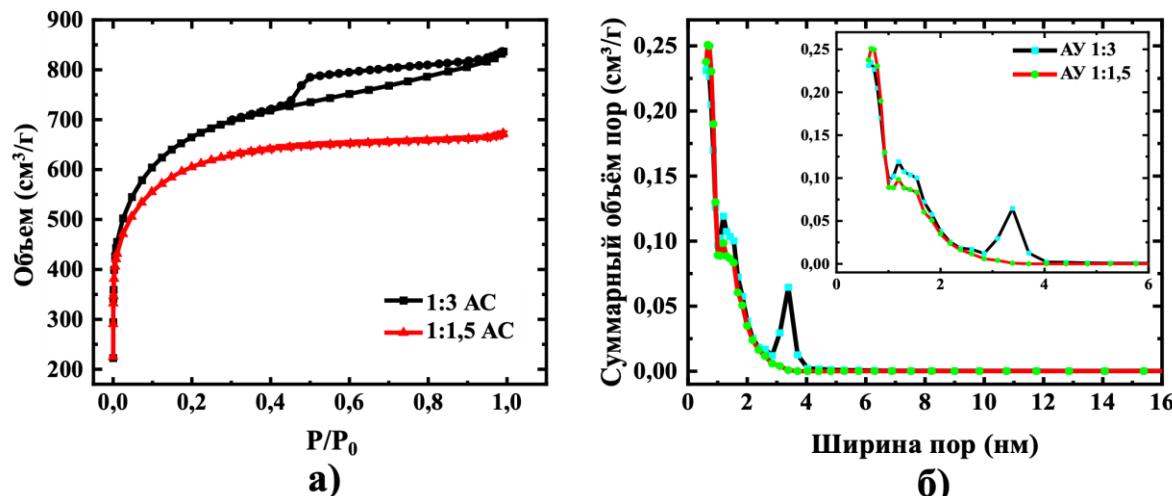


Рисунок 2. Изотермы адсорбции-десорбции азота для АУ (а) и распределение пор по размерам (б).

Изотермы адсорбции-десорбции азота при температуре 77 К для УМ соответствуют типу IV по классификации IUPAC (Rijfkogel et al., 2019; Sing, 1985), показывают наличие гистерезисной петли типа H4 для АУ 1:3, что свидетельствует о наличии мезопор щелевидной формы. УМ активированный в соотношении 1:1,5 не имеет выраженной гистерезисной петли, что свидетельствует о микропористой структуре, а также об отсутствии капиллярной конденсации в поровом пространстве. Наличие развитой микропористой структуры можно увидеть по быстрому увеличению объема адсорбированного азота при относительно низких давлениях ($P/P_0 < 0,1$) для обоих исследуемых образцов АУ (Rijfkogel et al., 2019).

Результаты структурных исследований изображены на Рисунке 3. РДА кривая каждого УМ имеет два широких дифракционных пика примерно при 23° и 43° соответствующие плоскостям (002) и (100), соответственно. Слабо выраженные пики в области 23° и $43\text{--}44^\circ$, для обоих образцов УМ свидетельствует об ограниченной упорядоченности структуры в плоскости и высокой аморфности материалов (Feng and Yang, 2024; Goskula et al., 2023).

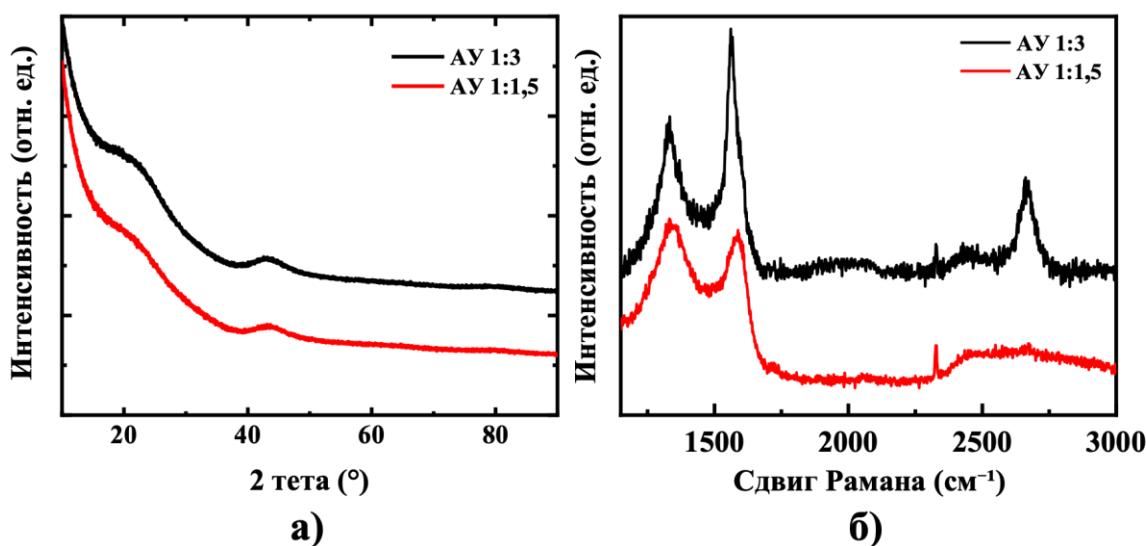


Рисунок 3. Кривые рентгенодифракционного анализа (а) и (б) Раман-спектроскопии

Спектроскопия Рамана показала наличие свойственных для УМ полос D и G, в диапазонах $1339\text{-}1348\text{ см}^{-1}$ и $1586\text{-}1593\text{ см}^{-1}$, соответственно. Полоса D отражает колебания, индуцированные дефектами, и структурные нарушения в углеродной решётке. Полоса G обусловлена колебаниями растяжения в плоскости атомов углерода с гибридизацией sp^2 в графитоподобных структурах (He et al., 2017; Said et al., 2023; Suresh Kumar Reddy et al., 2015). Сравнение спектров показало, что АУ 1:3 имеет выраженные пики с четким, острым концом, в то время как в АУ 1:1,5 присутствуют широкие полосы D и G. В случае АУ 1:3 наблюдают пик 2D ($\sim 2700\text{ см}^{-1}$), что указывает на более высокую степень графитового упорядочения и более высокую степень графитизации, поскольку для второго УМ данная полоса не наблюдается (либо очень широкая).

Интегральное соотношение площадей пиков D и G (I_D/I_G) позволяет оценить степень структурного беспорядка в углеродсодержащих материалах: увеличение значения I_D/I_G указывает на возрастание степени беспорядка (Li et al., 2023). Соотношение $I_D/I_G \approx 1.04$ для АУ 1:3 свидетельствует о структурированном характере поверхности, в то время как АУ 1:1,5 $I_D/I_G \approx 1.52$ имеет большее количество дефектов поверхности. Также соотношение пиков указывает на увеличение проводимости УМ, что является характеристикой эффективности рабочих электродов.

3.2 Оценка электрохимической эффективности

Анализ электрохимической эффективности проведен в симметричных ячейках при комнатной температуре со скоростью сканирования 5 мВ/с. Кривые ЦВА (Рисунок 4а) имеют квазипрямоугольную форму, что свидетельствует о получении двойного электрического слоя на границе электрод-электролит, и что накопление заряда идет без участия химических реакций (Béguin et al., 2014; Laheäär et al., 2015). Отклонение от идеального прямоугольника указывает на небольшую долю псевдоемкости, которая обусловлена редокс-реакциями между электролитом и функциональными группами (-COOH, -C=O) на поверхности УМ (Chen et al., 2017; Heidarinejad et al., 2020; Lin et al., 2015). Поверхность модифицированного активированного угля содержит кислородсодержащие и азотсодержащие функциональные группы, такие, как -OH, -COOH, -C=O и -NH₂, которые способствуют улучшению электропроводности и увеличению псевдоёмкостных эффектов. Наличие этих групп обеспечивает более эффективный перенос ионов и способствует стабильной работе

суперконденсаторов при циклировании. Размер площади под ЦВА кривыми подтверждает большую емкость АУ 1:3 по сравнению с АУ 1:1,5, что согласуется с их значениями УПП.

После циклического сканирования ячейки испытаны гальваностатическими циклами заряд-разряд при разных плотностях тока. Для обоих образцов АУ кривые заряда-разряда имеют типичную правильную треугольную форму для суперконденсаторов (Рисунок 4б и 4в). АУ 1:3 показывает максимальное время заряда-разряда (492 секунды). Также ячейки испытаны на длительность циклирования при плотности тока 0,2 А/г (Рисунок 4г). На протяжении всех 10000 циклов заряда-разряда сохранялись высокие значения кулоновской эффективности (около 99%) и стабильная емкость, что указывает на стабильность системы и соответствует ожидаемым характеристикам суперконденсаторов с двойным электрическим слоем (Béguin et al., 2014; Chen et al., 2017).

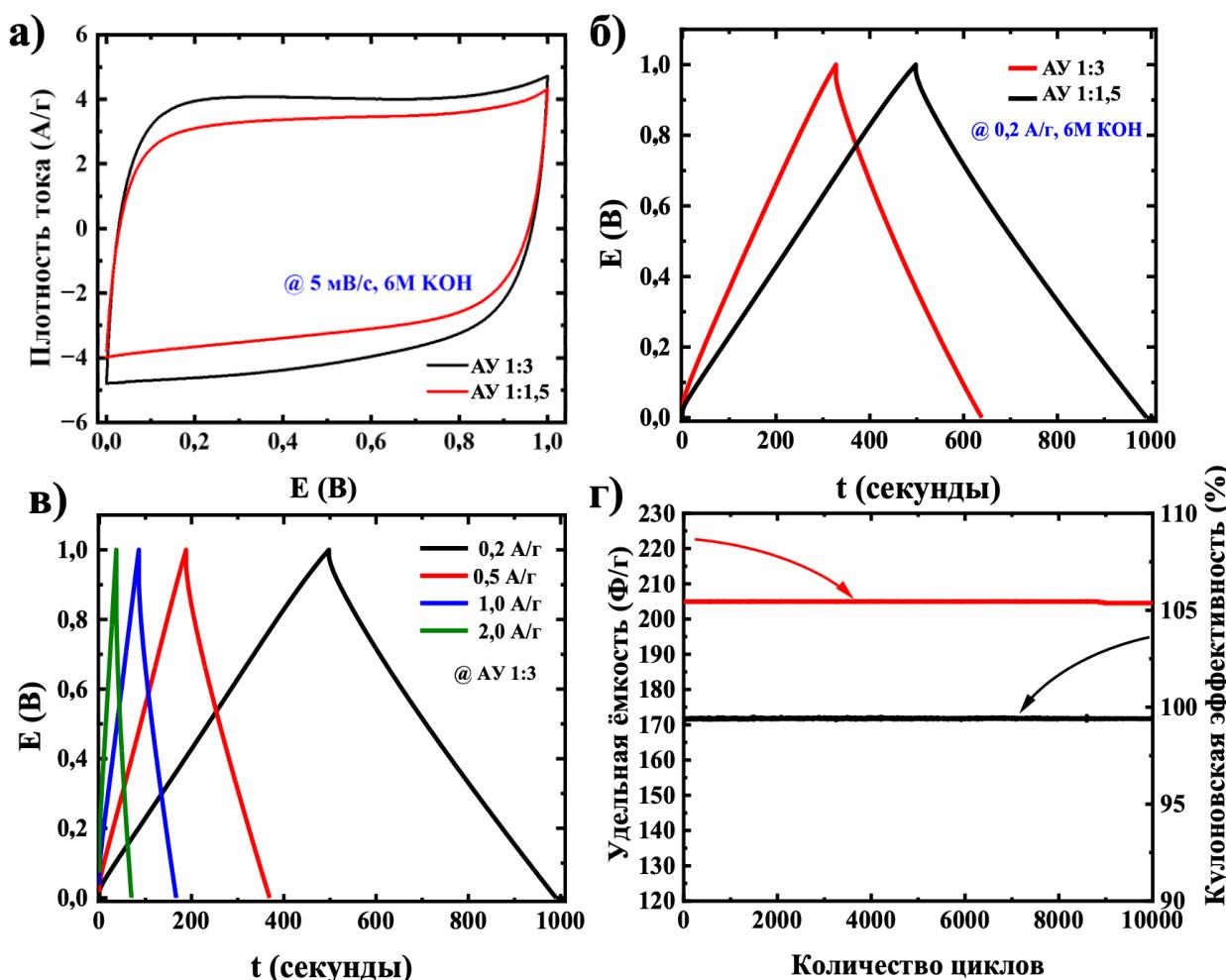


Рисунок 4. (а) Кривые ЦВА АУ при скорости сканирования 5 мВ/с; (б) кривые гальваностатического заряда-разряда двух образцов АУ при 0,2 А/г; (в) при различных плотностях тока; (г) длительное циклирование АУ 1:3 при плотности тока 0,2 А/г.

Расчет удельной емкости ($\Phi/\text{г}$) по кривым заряда-разряда проведены с использованием уравнения:

$$C_{\text{spec}} = \frac{I\Delta t}{m\Delta V} \quad (1)$$

где I - значение подаваемого тока в амперах (А), Δt - время разряда в секундах, m - масса активного вещества в граммах, ΔV - рабочее напряжение с учетом IR-падения напряжения (В).

Стоит отметить, что оба образца имели минимальные значения IR-падения напряжения, что, в свою очередь, свидетельствует о хорошем контакте между электродом и токосъёмником, а также о высокой проводимости активного материала.

Энергетическая плотность (E_{spec}) рассчитывается по формуле (2) [18]:

$$E_{spec} = \frac{c_{spec} \cdot U_{max}^2}{7.2} \quad (2)$$

Значения удельной мощности (Вт/кг) рассчитаны по формуле (3):

$$P = \frac{3600 \cdot E_{spec}}{\Delta t} \quad (3)$$

Для определения сопротивления в ячейке использован метод ЭИС (Рисунок 5). Полученные графики типичны для суперконденсаторов на основе АУ и сопоставимы с ранее полученными результатами (Ghosh et al., 2019; Tang et al., 2025; Zhao et al., 2024).

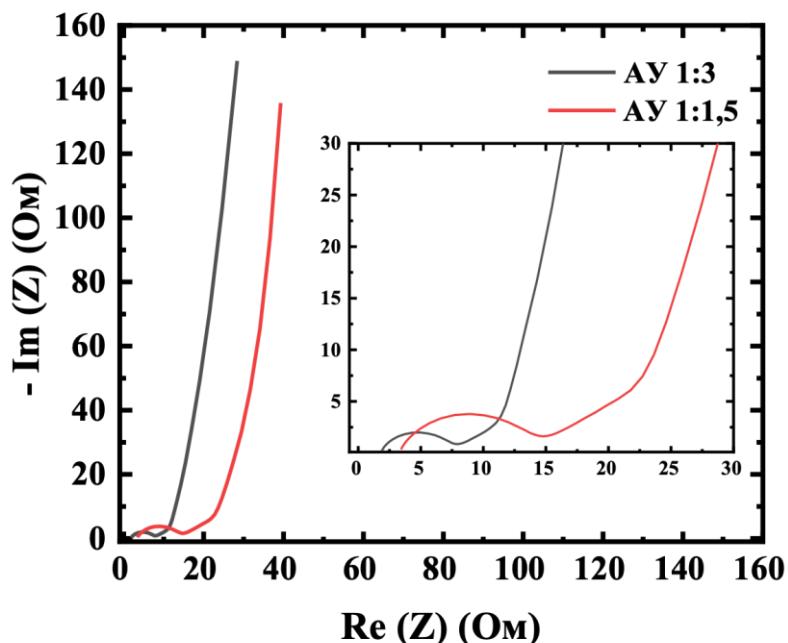


Рисунок 5. Кривые импедансной спектроскопии для двух образцов АУ

Полукруг, полученный на высоких частотах, отвечает за сопротивление переноса заряда между токосъёмниками и активным материалом (активированным углем). Расчет емкостных параметров по данным импедансной спектроскопии проводился в соответствии с методикой, описанной в работах (Béguin et al., 2014; Laheäär et al., 2015; Parejo-Tovar and Béguin, 2024). Полученные результаты с указанием стандартных отклонений эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС), сопротивления переноса заряда (СПЗ), ионного сопротивления (ИС) и сопротивления диффузии (СД) приведены в Таблице 1. Приведённые данные подтверждают, что АУ 1:3 обладает лучшими транспортно-кинетическими свойствами по сравнению с АУ 1:1,5.

Таблица 1. Значения сопротивлений АУ 1:3 и 1:1,5

Активированный уголь	ЭПС, Ω	СПЗ, Ω	ИС, Ω	СД, Ω
1:3	$1,58 \pm 0,03$	$2,21 \pm 0,12$	$2,92 \pm 0,15$	$6,61 \pm 0,11$
1:1,5	$2,52 \pm 0,23$	$2,23 \pm 0,18$	$4,21 \pm 0,23$	$8,78 \pm 0,11$

4. Обсуждение

Методом химической активации получены АУ с высокими значениями УПП, которая для АУ 1:3 составила $2423 \text{ м}^2/\text{г}$. Объём пор, рассчитанный с использованием теории функционала плотности закалённого твёрдого тела, составил $1,19 \text{ см}^3/\text{г}$. Для АУ 1:1,5 значение УПП составляет $2215 \text{ м}^2/\text{г}$ при объёме пор $0,953 \text{ см}^3/\text{г}$. Распределение пор по размерам показывает отсутствие мезопор для АУ 1:1,5; в то время как суммарный объем мезопор АУ 1:3 составляет больше $0,06 \text{ см}^3/\text{г}$. Анализ СЭМ показал образование пористой структуры с хорошо распределенными порами, что доказывает успешную активацию, и показывает возможность использования углей в качестве электродов для суперконденсаторов с двойным электрическим слоем.

Структурный анализ активированного KOH угля АУ 1:3 показывает значительную пористость и наличие дефектов поверхности. Эти особенности обеспечивают высокую удельную поверхность и большое количество функциональных групп на поверхности УМ (-COOH, -C=O и -OH), что благоприятно сказывается на адсорбционных и электрохимических свойствах материала.

АУ 1:3 продемонстрировал удельную емкость 204 Ф/г при плотности тока $0,2 \text{ А/г}$, для АУ 1:1,5 значение удельной емкости составляло 128 Ф/г . При циклировании с различными плотностями тока наблюдалось, что с увеличением плотности тока время заряда–разряда сокращается. Удельная емкость при этом составила 182 Ф/г при $0,5 \text{ А/г}$ и 165 Ф/г при 1 А/г , что соответствует ожидаемому поведению суперконденсаторов с двойным электрическим слоем. Рассчитанная для такой ячейки плотность энергии составило $28,3 \text{ Втч/кг}$, удельная мощность равна 205 Вт/кг (см. Уравнение 3), что является хорошим показателем для углей, полученных из биоотходов (Таблица 2).

Таблица 2. Сравнение электрохимических характеристик углеродных материалов из биоотходов с литературными данными

Материал	Удельная ёмкость	Энергия и Мощность	Электролит	Тип ячейки
Сухая трава <i>Hyparhennia hirta</i> (<i>Duraisamy et al., 2025</i>)	$106,6 \text{ Ф/г}$ при 2 А/г	$33,3 \text{ Втч/кг}$ при плотности мощности 1500 Вт/кг	$1\text{M Na}_2\text{SO}_4$	симметричная
Пшеничная шелуха (<i>Wang et al., 2022</i>)	346 Ф/г при 1 А/г	$12,02 \text{ Втч/кг}$ при плотности мощности 250 Вт/кг	$1\text{M H}_2\text{SO}_4$	симметричная
Липа (<i>Yan et al., 2022</i>)	$172,5 \text{ Ф/г}$ при 2 А/г	$22,44 \text{ Втч/кг}$ при $0,05 \text{ А/г}$. $1996,4 \text{ Вт/кг}$ при $2,5 \text{ А/г}$	6M KOH	симметричная

Жмых винограда (<i>Zhang et al., 2020</i>)	239 Ф/г при 0,5 А/г	16,3 Втч/кг при плотности мощности 348,3 Вт/кг	1M H ₂ SO ₄	симметричная
Семена щетинной травы (<i>Liang et al., 2021</i>)	358 Ф/г при 0,5 А/г	-	6M KOH	трехэлектродная конфигурация
Кожура помело (<i>Li et al., 2020</i>)	66,5 Ф/г при 1 А/г	36 ± 1,5 Втч/кг при плотности мощности 1000 Вт/кг	2M Li ₂ SO ₄	симметричная
Рисовая шелуха (<i>Liu et al., 2022</i>)	103,4 Ф/г при 20 А/г; 148,3 Ф/г при 0,2 А/г	2,7 Втч/кг при плотности мощности 4300 Вт/кг	6M KOH	симметричная
Косточки фиников (данная работа)	204 Ф/г при 0,2 А/г; 182 Ф/г при 0,5 А/г; 165 Ф/г при 1 А/г	28,3 Втч/кг при плотности мощности 205 Вт/кг	6M KOH	симметричная

Результаты длительного циклирования показывают, что КПД на протяжении всего циклирования стабильный и составлял не менее 99,7%. Это, в свою очередь, является сравнительно хорошим показателем среди других суперконденсаторов, полученных из биоотходов. Высокое значение кулоновской эффективности на протяжении 10000 циклов объясняется прямым контактом между электродом и токосъемником, что уменьшило дополнительное сопротивление между ними, дополнительно толщина электродов в 100 мкм позволила использовать поверхность УМ полностью.

В ходе анализа методом импедансной спектроскопией для АУ 1:3 получены низкие значения СПЗ, ИС и ЭПС, что в совокупности указывает на снижение суммарного внутреннего сопротивления (на контакте электрод–токосъемник и в электролите) (Laheäär et al., 2015; Parejo-Tovar and Béguin, 2024). Это обеспечивает более быстрые межфазные процессы и эффективный перенос ионов через поры, а также сниженную величину сопротивления в пористом электроде. Низкое значение ЭПЗ делает АУ 1:3 лучшим УМ для суперконденсаторов, так как именно ЭПЗ отвечает за падение напряжения в системе и влияет на мощностные характеристики. Низкое падение напряжения в системе, в свою очередь, дает низкую потерю мощности в дальнейшем (Laheäär et al., 2015). Более того, несмотря на то, что для двух УМ использован один и тот же электролит (6M KOH), значения ИС отличаются, что, вероятно, связано с различиями в пористой структуре и химическом составе поверхности электродного материала.

5. Заключение

Из косточек фиников получены активированные угли с большой УПП, с оптимальными размерами и объемом пор, что увеличило удельную емкость и стабилизировало эффективность симметричного суперконденсатора на протяжении 10000 циклов. Электрохимическая эффективность подтверждена импедансной спектроскопией, что показало низкие значения ионного сопротивления, сопротивления между контактами, а также сопротивление переноса заряда. В ходе исследования определено оптимальное соотношение сырья к активатору 1:3. Изменения в структуре АУ подтверждены РДА, Раман-

спектроскопией и БЭТ-анализом. Уголь, активированный таким образом, показал УПП равную 2423,4 м²/г. Большой объем пор и наличие микро- и мезопористой структуры АУ 1:3 делает его потенциально перспективным материалом для применения в адсорбционных, катализических и электрохимических системах.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов:

Концептуализация - Н.М., А.Б.; методология - Н.М.; валидация - А.Б., А.Н., А.М.; исследование - Н.М.; курирование данных - А.Б.; написание - подготовка оригинального черновика - Н.М.; написание - рецензирование и редактирование - Н.М.; руководство - А.Н., А.М.; администрирование проекта - А.Н; получение финансирования - А.Н. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторе

Маканова, Назым – ассистент исследователя, National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, ул. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан, 010000; nazym.makanova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-0208-278X>

Белгібаева, Аяулым – ведущий научный сотрудник, National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, Институт аккумуляторов, ул. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан, 010000; ayaulym.belgibayeva@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3052-5241>

Муканова, Алия – ведущий научный сотрудник, National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, Институт аккумуляторов, ул. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан, 010000; aliya.mukanova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1171-176X>

Нурпейсова, Арайлым – ведущий научный сотрудник, National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, Институт аккумуляторов, ул. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан, 010000; arailym.nurpeissova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9657-2964>

9. Финансирование: данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №BR24992766, грант №BR21882402).

10. Благодарности: нет.

11. Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Béguin, F., Presser, V., Balducci, A., & Frackowiak, E. (2014). Carbons and electrolytes for advanced supercapacitors. *Adv Mater*, 26, 2219–2251. <https://doi.org/10.1002/adma.201304137>
2. Chen, X., Paul, R., & Dai, L. (2017). Carbon-based supercapacitors for efficient energy storage. *Natl Sci Rev*, 4, 453–489. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx009>
3. Duraisamy, N., Shenniangirivalasu, K., Dhandapani, E., Kandiah, K., Panchu, S. J., & Swart, H. C. (2025). Biomass Derived 3D Hierarchical Porous Activated Carbon for Solid-State Symmetric Supercapacitors. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. <https://doi.org/10.1007/s10904-025-03837-x>
4. Elanthamilan, E., Catherin Meena, B., Renuka, N., Santhiya, M., George, J., Kanimozhi, E.P., Christy Ezhilarasi, J., & Princy Merlin, J. (2021). Walnut shell derived mesoporous activated carbon for high performance electrical double layer capacitors. *J Electroanal Chem*, 901, 115762. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115762>

5. Feng, Y., & Yang, Q. (2024). Porous carbon derived from activated banana peels for energy storage and conversion application. In: Elsevier (Eds.), *Banana Peels Valorization*, 229–258. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95937-7.00010-X>
6. Ghosh, S., Santhosh, R., Jeniffer, S., Raghavan, V., Jacob, G., Nanaji, K., Kollu, P., Jeong, S. K., & Grace, A. N. (2019). Natural biomass derived hard carbon and activated carbons as electrochemical supercapacitor electrodes. *Sci Rep*, 9, 52006. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52006-x>
7. Goskula, S., Siliveri, S., Gujjula, S. R., Adepu, A. K., Chirra, S., & Narayanan, V. (2023). Development of activated sustainable porous carbon adsorbents from Karanja shell biomass and their CO₂ adsorption. *Biomass Convers Biorefin*, 14, 32413–32425. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05198-2>
8. He, Z., Zhang, G., Chen, Y., Xie, Y., Zhu, T., Guo, H., & Chen, Y. (2017). The effect of activation methods on the electrochemical performance of ordered mesoporous carbon for supercapacitor applications. *J Mater Sci*, 52, 8161–8173. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0536-x>
9. Heidarinejad, Z., Dehghani, M.H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environ Chem Lett*, 18, 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
10. Hu, Z., & Srinivasan, M. P. (1999). Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell. *Microporous Mesoporous Mater*, 27, 11–18. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(98\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(98)00183-8)
11. Huang, S., Zhu, X., Sarkar, S., & Zhao, Y. (2019). Challenges and opportunities for supercapacitors. *APL Mater*, 7, 100902. <https://doi.org/10.1063/1.5116146>
12. Issatayev, N., Tassybay, K., Wu, N.-L., Nurpeissova, A., Bakenov, Z., & Kalimuldina, G. (2024). LiF modified hard carbon from date seeds as an anode material for enhanced low-temperature lithium-ion batteries. *Carbon*, 229, 119479. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119479>
13. Laheäär, A., Przygocki, P., Abbas, Q., & Béguin, F. (2015). Appropriate methods for evaluating the efficiency and capacitive behavior of different types of supercapacitors. *Electrochim Commun*, 60, 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2015.07.022>
14. Lee, H.-C., Byamba-Ochir, N., Shim, W.-G., Balathanigaimani, M. S., & Moon, H. (2015). High-performance supercapacitors based on activated anthracite with controlled porosity. *J Power Sources*, 275, 668–674. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.072>
15. Li, G., Iakunkov, A., Boulanger, N., Lazar, O. A., Enachescu, M., Grimm, A., & Talyzin, A. V. (2023). Activated carbons with extremely high surface area produced from cones, bark and wood using the same procedure. *RSC Adv*, 13, 14543–14553. <https://doi.org/10.1039/D3RA00820G>
16. Li, G., Li, Y., Chen, X., Hou, X., Lin, H., & Jia, L. (2020). One-step synthesis of N, P co-doped hierarchical porous carbon nanosheets derived from pomelo peel for high-performance supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153123>
17. Liu, Y., Tan, H., Tan, Z., & Cheng, X. (2022). Rice husk-derived capacitive carbon prepared by one-step molten salt carbonization for supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 55, 105437. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105437>
18. Liang, X., Liu, R., & Wu, X. (2021). Biomass waste derived functionalized hierarchical porous carbon with high gravimetric and volumetric capacitances for supercapacitors. *Microporous and Mesoporous Materials*, 310, 110659. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110659>
19. Lin, G., Wang, F., Wang, Y., Xuan, H., Yao, R., Hong, Z., & Dong, X. (2015). Enhanced electrochemical performance of ordered mesoporous carbons by a one-step carbonization/activation treatment. *J Electroanal Chem*, 758, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.10.016>
20. Menya, E., Olupot, P.W., Storz, H., Lubwama, M., & Kiros, Y. (2018). Production and performance of activated carbon from rice husks for removal of natural organic matter from

- water: A review. *Chem Eng Res Des*, 129, 271–296. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.11.008>
21. Neimark, A. V., Lin, Y., Ravikovitch, P. I., & Thommes, M. (2009). *Quenched solid density functional theory and pore size analysis of micro-mesoporous carbons*. *Carbon*, 47(7), 1617–1628. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.01.050>
22. Parejo-Tovar, A., & Béguin, F. (2024). The NaClO₄-water eutectic electrolyte for environmentally friendly electrical double-layer capacitors operating at low temperature. *Energy Storage Mater*, 69, 103387. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103387>
23. Poonam, Sharma, K., Arora, A., & Tripathi, S. K. (2019). Review of supercapacitors: Materials and devices. *J Energy Storage*, 21, 801–825.
24. Ravikovitch, P. I., & Neimark, A. V. (2006). Density functional theory model of adsorption on amorphous and microporous silica materials. *Langmuir*, 22(26), 11171–11179. <https://doi.org/10.1021/la061560m>
25. Rijfkogel, L. S., Ghanbarian, B., Hu, Q., & Liu, H.-H. (2019). Clarifying pore diameter, pore width, and their relationship through pressure measurements: A critical study. *Mar Pet Geol*, 107, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.05.019>
26. Said, B., Bacha, O., Rahmani, Y., Harfouche, N., Kheniche, H., Zerrouki, D., Belkhalfa, H., & Henni, A. (2023). Activated carbon prepared by hydrothermal pretreatment-assisted chemical activation of date seeds for supercapacitor application. *Inorg Chem Commun*, 155, 111012. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111012>
27. Sing, K. S. W. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure Appl Chem*, 57, 603–619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
28. Sujiono, E. H., Zabrian, D., Zurnansyah, M., Mulyati, Z., Zharvan, V., Samnur, & Humairah, N. A. (2022). Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results Chem*, 4, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100291>
29. Supiyeva, Z., Pan, X., & Abbas, Q. (2023). The critical role of nanostructured carbon pores in supercapacitors. *Curr Opin Electrochem*, 39, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.colelec.2023.101249>
30. Suresh Kumar Reddy, K., Al Shoabi, A., & Srinivasakannan, C. (2015). Impact of process conditions on preparation of porous carbon from date palm seeds by KOH activation. *Clean Technol Environ Policy*, 17, 1671–1679. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0875-8>
31. Tang, M., Meng, Y., Yang, Y., & Wu, S. (2025). Expanding the electrochemical stable window of water through propylene carbonate addition for aqueous-based energy storage devices. *Chem Eng J*, 504, 158831. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158831>
32. Wang, J., & Kaskel, S. (2012). KOH activation of carbon-based materials for energy storage. *J Mater Chem*, 22, 23710–23725. <https://doi.org/10.1039/c2jm34066f>
33. Wang, Y., Chen, Y., Zhao, H., Li, L., Ju, D., Wang, C., & An, B. (2022). Biomass-Derived Porous Carbon with a Good Balance between High Specific Surface Area and Mesopore Volume for Supercapacitors. *Nanomaterials*, 12(21), 3804. <https://doi.org/10.3390/nano12213804>
34. Yan, B., Zheng, J., Feng, L., Du, C., Jian, S., Yang, W., Wu, Y. A., Jiang, S., He, S., & Chen, W. (2022). Wood-derived biochar as thick electrodes for high-rate performance supercapacitors. *Biochar*, 4(1), 50. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00176-9>
35. Yang, Z., Gleisner, R., Mann, D. H., Xu, J., Jiang, J., & Zhu, J. Y. (2020). Lignin based activated carbon using H₃PO₄ activation. *Polymers*, 12, 2829. <https://doi.org/10.3390/polym12122829>
36. Zhai, Z., Zhang, L., Du, T., Ren, B., Xu, Y., Wang, S., Miao, J., & Liu, Z. (2022). A review of carbon materials for supercapacitors. *Mater Des*, 223, 111017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111017>
37. Zhang, J., Chen, H., Ma, Z., Li, H., Dong, Y., Yang, H., Yang, L., Bai, L., Wei, D., & Wang, W. (2020). A lignin dissolution-precipitation strategy for porous biomass carbon materials derived

- from cherry stones with excellent capacitance. *J Alloys Compd*, 832, 155029. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155029>
38. Zhang, J., Chen, H., Bai, J., Xu, M., Luo, C., Yang, L., Bai, L., Wei, D., Wang, W., & Yang, H. (2020). N-doped hierarchically porous carbon derived from grape marcs for high-performance supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 846, 157207. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157207>
39. Zhao, X., Wang, H., Guliqire, T., Sun, C., & Yang, C. (2024). The influence of ethylene glycol on the low-temperature electrochemical performance of carbon-based supercapacitors. *Ionics*, 30, 5675–5683. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-05535-z>

Суперконденсаторларда қолдану үшін биомасса қалдықтарынан активтендірілген көмір алу

Назым Мақанова, Аяулым Белгібаева, Алия Муканова, Арайлым Нурпейсова

Аннатація. Энергияны сақтайтын материалдарға деген жоғары сұраныс және тұрақты да таза даму қажеттілігі ғалымдардың жаңартылатын ресурстарды пайдалануға және биоқалдықтарды жоюға назарын арттыруды. Бұл жұмыста біз құрма дәнектерін қолдандық – тамақ өнеркәсібінің қол жетімді және жыл сайын жаңартылатын жанама өнімі. Көміртегіге бай құрма тұқымдары суперконденсаторлардағы көміртекті электродтардың прекурсорлары ретінде қызмет ету үшін үлкен потенциалға ие. Циклдік тұрақтылық пен кулондық тиімділікті арттыру үшін еркін тұра алатын электродтар жасалды. KOH мен биокөмірдің 1:3 қатынасындағы активтендіру процесі 0,2 A/g токтықтырылғанда екі электродты симметриялы жүйе үшін 204 F/g меншікті сыйымдылықты, сондай-ақ 28,3 Wh/kg энергия тығыздығын және 205 W/kg меншікті қуатты алуға мүмкіндік берді. Бұл осы тәсілдің құрылымдық тұтастықты арттырудағы және электрохимиялық қасиеттерін жақсартудағы тиімділігін көрсетеді. БЭТ анализі 1:3 KOH қатынасында белсендірілген көмірдің меншікті бетінің ауданының мәні 2423,4 m²/g болатынын көрсетті. Бұл зерттеуде еркін тұратын электродтарды енгізу кулондық тиімділікті 99,97% жеткізді, бұл өз кезегінде суперконденсаторлардың жоғары өнімділігін алуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: суперконденсаторлар, көміртекті материал, активтендірілген көмір, химиялық активтендіру.

Production of activated carbon from biomass waste for application in supercapacitors

Nazym Makanova, Ayaulyym Belgibayeva, Aliya Mukanova, Arailym Nurpeissova

Abstract: The high demand for energy conservation materials and the need for sustainable and environmentally friendly development increase scientists' attention to the use of renewable resources and the disposal of bio-waste. In this work, we used date seeds, an affordable and annually renewable byproduct of the food industry. Rich in carbon, date seeds have the innate potential to serve as precursors to carbon electrodes in supercapacitors. To increase cyclic stability and Coulomb efficiency, free-standing electrodes were manufactured. The activation process with a KOH to biochar ratio of 1:3 allowed us to obtain a specific capacitance of 204 F/g for a two-electrode symmetrical system with a current density of 0.2 A/g, as well as an energy density of 28,3 Wh/kg and a specific power of 205 W/kg, which emphasizes the effectiveness of this approach in increasing

structural integrity and improving electrochemical properties. The BET analysis revealed a high surface area of carbon activated in a ratio of 1:3 KOH, the value for which was $2423.4 \text{ m}^2/\text{g}$. In this study, the introduction of free-standing electrodes resulted in a high Coulomb value of 99.97%, which in turn allows for high performance of supercapacitors.

Keywords: supercapacitors, carbon material, activated carbon, chemical activation.