

## Влияние размера пор углеродных материалов на характеристики гибридных суперконденсаторов в водном окислительно-восстановительном электролите

Ж.А. Супиева<sup>1,2\*</sup>, А.Ю. Захаров<sup>1</sup>, Ж.Е. Аяганов<sup>1,2</sup>, В.В. Павленко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

### АННОТАЦИЯ

В данной работе исследуется влияние пористой структуры углеродных материалов на характеристики гибридных суперконденсаторов с использованием водного окислительно-восстановительного электролита  $5\text{M NaNO}_3 + 0,5\text{M NaI}$ . Были синтезированы три различных углеродных материала, включая активированный уголь из рисовой шелухи, углерод из цитрата магния и углерод, полученный с использованием темплата кремнезема. Оптимизация пористой структуры положительного электрода позволила достичь удельной емкости  $403 \text{ Ф/г}$  и удельной энергии  $30 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$  при плотности тока  $0,5 \text{ А/г}$  для ячейки с положительным электродом со средним размером пор  $3,4 \text{ нм}$ . Результаты экспериментов показали, что размер пор и площадь поверхности существенно влияют на способность удерживать иодиды, что, в свою очередь, определяет емкость и удельную энергию гибридного суперконденсатора. Использование активированного угля с порами менее  $1 \text{ нм}$  позволило достичь высокой энергетической эффективности в  $79\%$ .

*Ключевые слова:* пористая структура, гибридный конденсатор, иодиды, двойной электрический слой, устройства накопления энергии

### 1. Введение

Потребность в эффективных устройствах хранения энергии и развитие зеленой энергетики являются одной из важнейших глобальных проблем на сегодня, обусловленной необходимостью сокращения выбросов парниковых газов от ископаемого топлива [1]. Среди новых технологий хранения энергии суперконденсаторы привлекают внимание благодаря своей высокой плотности мощности, быстрым циклам заряда-разряда, длительному сроку службы и безопасности эксплуатации [2, 3]. Эти свойства делают суперконденсаторы перспективными для устранения проблем, где быстрая подача энергии и долговечность имеют решающее значение.

Суперконденсаторы хранят энергию посредством накопления заряда на границе раздела электрод-электролит в электрических двухслой-

ных конденсаторах (ЭДК) либо посредством быстрых окислительно-восстановительных (редокс) реакций в псевдоконденсаторах [4]. Гибридные суперконденсаторы (ГСК) объединяют оба механизма хранения, имея повышенные плотность энергии и мощности по сравнению с ЭДК и псевдоконденсаторами по отдельности [5, 6]. Эти свойства ГСК удовлетворяют требованиям современных систем хранения энергии, в которых необходимы как высокая плотность энергии, так и быстрые циклы заряда-разряда [7, 8].

Производительность ГСК в значительной степени зависит от пористой структуры и площади поверхности углеродных материалов, используемых в качестве электродов [9, 10]. В работе показано, что оптимизация размера и распределения пор значительно улучшает емкость и плотность энергии [11]. В частности, контроль размера пор позволяет лучше удерживать ионы в процессе редокс-реакции, предотвращая взаимодействие с электролитом и челночный эффект, влияя на эффективность процесса хранения энергии [12].

\*Ответственный автор

E-mail: zhazyra@mail.ru

В этом исследовании изучается влияние структуры пор на производительность ГСК с использованием водного электролита  $5\text{M NaNO}_3 + 0,5\text{M NaI}$ . Выбранный электролит обладает рядом преимуществ, включая экологическую безопасность, негорючесть, высокую ионную проводимость и низкие производственные затраты [13-15]. Данная работа направлена на повышение удельной емкости и плотности энергии ГСК за счет изменения размера пор и площади поверхности, способствуя разработке более эффективных и устойчивых систем хранения энергии.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Синтез углеродных материалов

Для изучения влияния пористой структуры на характеристики ГСК были синтезированы три углеродных материала: активированный уголь из рисовой шелухи (РШ), углерод с использованием «эндогенного» темплата цитрата магния (МТ) и углерод с применением «жесткого» темплата коллоидного раствора диоксида кремния со средним размером частиц 12 нм (КТ).

Рисовую шелуху, полученную с фермерских хозяйств Алматинской области, карбонизировали при температуре  $550\text{ }^\circ\text{C}$  в токе азота (150 мл/мин) в течение 90 минут. Полученный карбонизат измельчали, а затем выщелачивали в  $2,5\text{ M}$  растворе  $\text{NaOH}$  при  $90\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 24 часов. После промывки дистиллированной водой до нейтрального pH карбонизат сушили при  $110\text{ }^\circ\text{C}$  до постоянной массы. Высушенный карбонизат смешивали с щелочным активатором (KOH) в соотношении 1:4 по массе (карбонизат:KOH), после чего смесь помещали в реактор из нержавеющей стали и выдерживали при  $800\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 1 ч в токе азота (150 мл/мин), т.к. данная температура оптимальна для обеспечения высокой скорости и полноты процесса активации. Повышение температуры активации позволяет уменьшить площадь поверхности активированного угля и количество микропор. После процесса активации полученный активированный уголь промывали до нейтрального pH и сушили при  $110\text{ }^\circ\text{C}$ . Для удаления функциональных групп с поверхности углеродного материала проводили постобработку при  $800\text{ }^\circ\text{C}$  в токе азота (150 мл/мин) в горизонтальной кварцевой печи и получили готовый продукт РШ с площадью поверхности  $2315\text{ м}^2/\text{г}$  и средним размером пор  $0,9\text{ нм}$ .

Для синтеза темплатного угля с использованием «жесткого» темплата готовили смесь коллоидного раствора диоксида кремния Ludox HS-40

(размер частиц 12 нм, Sigma-Aldrich) и глюкозы (ТОО «Лаборфарма», Казахстан) в соотношении 1:1 в перерасчете на массу сухих компонентов. Смесь карамелизовали при  $70\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 48 ч, затем карбонизировали в горизонтальной печи при  $800\text{ }^\circ\text{C}$  в токе азота (100 мл/мин) в течение 1 часа. Карбонизат измельчали в шаровой мельнице, выщелачивали кремнезем в  $3\text{ M}$  растворе  $\text{NaOH}$  при  $90\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 24 ч, затем промывали до нейтрального pH, сушили при  $110\text{ }^\circ\text{C}$  и получали КТ с высокой площадью поверхности  $1162\text{ м}^2/\text{г}$  и средним размером пор  $8,7\text{ нм}$ .

Цитрат магния (ТОО «Лаборфарма», Казахстан) использовали в том виде, в котором был получен. Выбор цитрата магния обусловлен его способностью регулировать размер пор посредством темплата  $\text{MgO}$ ; он демонстрирует большой потенциал в синтезе нанопористых углеродных материалов с высокой удельной поверхностью для применения в суперконденсаторах [16]. Карбонизацию проводили в горизонтальной кварцевой печи при  $800\text{ }^\circ\text{C}$  в токе азота (100 мл/мин) в течение 1 часа. Полученный карбонизат обрабатывали  $1\text{ M}$  раствором соляной кислоты при комнатной температуре в течение 24 ч для удаления темплата оксида магния, после чего промывали дистиллированной водой и сушили при  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , получали МТ с площадью поверхности  $1976\text{ м}^2/\text{г}$  и средним размером пор  $3,4\text{ нм}$ .

### 2.2. Подготовка электродов и электрохимические измерения

Эксперименты проводили в двухэлектродных ячейках типа Swagelok с токосъемниками из нержавеющей стали диаметром 12 мм. В качестве электролита использовали водные растворы  $5\text{ M NaNO}_3$  и  $0,5\text{ M NaI}$  (Sigma-Aldrich), в качестве сепаратора – гидрофильный PTFE-фильтр (с порами  $0,2\text{ мкм}$ , Hyundai Micro Co., Ltd). Свободностоящие электроды были изготовлены путем смешивания 85 мас.% активного материала, 10 мас.% проводящей добавки (Timcal Super C45) и 5 мас.% политетрафторэтилена (PTFE, Sigma-Aldrich, 60 мас.% дисперсия в воде). Для лучшей гомогенизации в смесь добавляли изопропанол и смешивали на магнитной мешалке при температуре  $70\text{ }^\circ\text{C}$  до образования пластилинообразной массы. Электроды формировали с помощью установки каландрирования и прокатывали до толщины  $150\text{ мкм}$ . Сформированный электродный материал сушили в вакууме при температуре  $110\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 12 ч, после чего вырезали электроды необходимого диаметра.

Электрохимические измерения были проведены с использованием потенциостат-гальваностат Corrtest CS2350M (Китай) в диапазоне напряжений от 0,1 В до 1,5 В. Данные циклической вольтамперометрии (ЦВА) были получены при скорости развертки 5 мВ/с, а гальваностатического заряда-разряда (ГЗР) при плотности тока 0,5 А/г. Все измерения проводили при комнатной температуре.

### 3. Результаты и обсуждение

Для оценки влияния пористой структуры на характеристики ГСК на основе йода были собраны ячейки с разным соотношением масс, а также различными материалами положительного электрода. В качестве отрицательного электрода, на котором не протекают редокс-реакции, был выбран РШ, т.к. он имеет наибольшую площадь поверхности, что является одним из ключевых факторов, влияющих на емкость двойного слоя. ГСК были названы в соответствии с материалом положительного электрода, а при указании соотношения масс положительный электрод всегда имеет индекс «1». На рис. 1 представлены ЦВА для ГСК с тремя различными массовыми соотношениями и материалами положительного электрода. Боль-

шинство ячеек демонстрирует квазипрямоугольную форму ЦВА, близкую к форме, типичной для электрических двухслойных конденсаторов. Однако в ячейке с положительным электродом РШ при массовом соотношении отрицательного к положительному электроду 3:1 наблюдается резкое увеличение тока в области 0,3 В. Это вызвано протеканием редокс-реакций на положительном электроде. При детальном анализе кривой ЦВА этой ячейки можно различить вклад емкости, обусловленной двойным электрическим слоем, и емкости, связанной с редокс-реакциями. При увеличении массы положительного электрода все ячейки приобретают конденсаторную форму кривой ЦВА. Предполагается, что следующие реакции происходят на положительном углеродном электроде с участием окислительно-восстановительной пары иодид/йод с образованием олигомерных иодидов [17]:

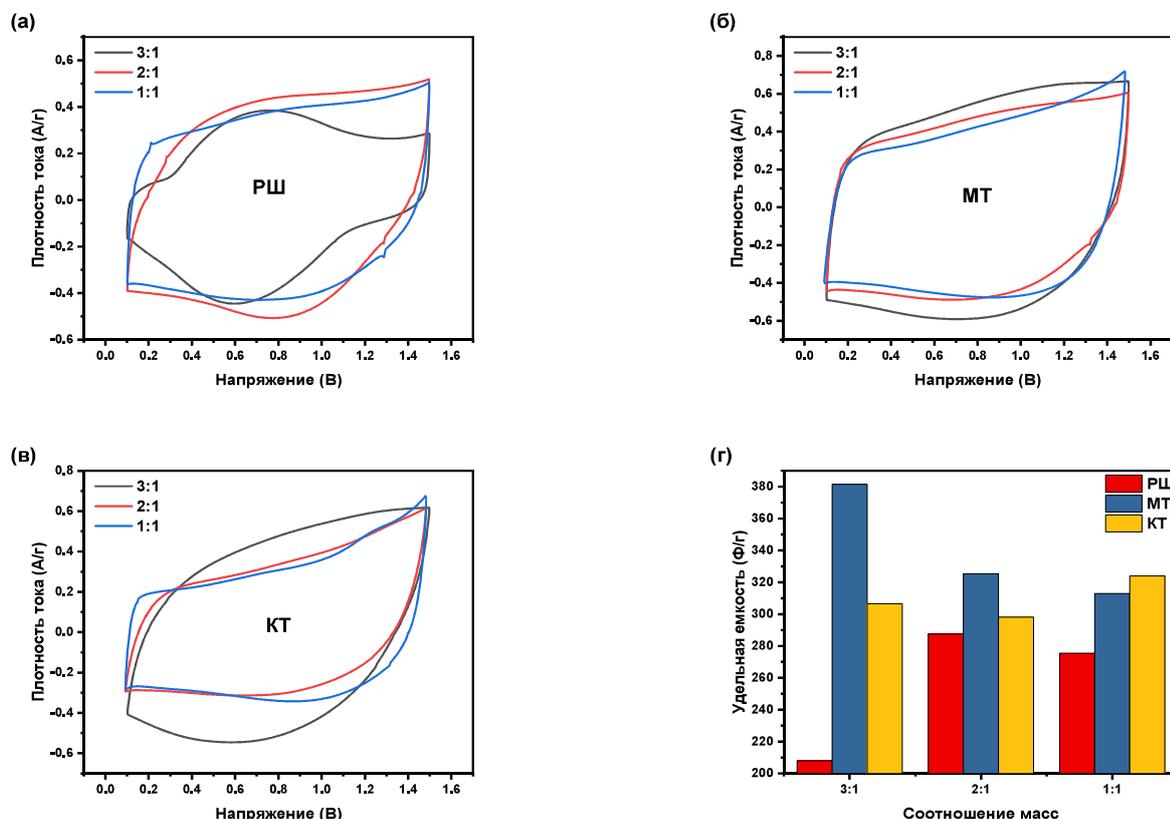


Рис. 1. ЦВА при 5 мВ/с для ячеек с разным соотношением масс отрицательного электрода РШ и положительного электрода (а) РШ, (б) МТ, (в) КТ и (г) соответствующие удельные емкости ячеек.

На рис. 2 представлены кривые ГЗР, из которых видно, что только системы с размерами пор менее 3,4 нм смогли достичь заданного напряжения в 1,5 В (рис. 2а, 2б), тогда как система с положительным электродом КТ имела максимальное напряжение ячейки в 1,3 В (рис. 2в). Это связано с тем, что микропористые угли способны лучше удерживать йодиды, тем самым препятствуя челночному эффекту, наблюдаемому в системах с использованием электролитов на основе йода. ГСК с положительным электродом МТ при соотношении масс 3:1 показал максимальную удельную емкость 403 Ф/г (рис. 2 г) практически в 4 раза выше, чем емкость двойного слоя в отрицательной области потенциала для данного угля в аналогичном электролите на основе брома [18]. Такого значительного увеличения удельной емкости удалось достичь за счет протекания редокс-реакции йодидов. В целом все ячейки демонстрируют значительное увеличение удельной емкости по сравнению с емкостью двойного слоя данных углей.

На рис. 3 представлены зависимость удельной энергии и энергетической эффективности от соотношения масс и материала положительного электрода ГСК. Помимо увеличения удельной емкости удалось значительно увеличить удельную энергию ГСК. Так, с положительным электродом МТ удельная энергия для ГСК составила 30 Вт ч/

кг (рис. 3а), что сопоставимо с характеристиками систем на основе органических электролитов [19]. Наибольшее значение удельной энергии для ячейки МТ может быть объяснено тем, что данный уголь имеет большую площадь поверхности, объем пор, а также диаметр пор. Однако, как и с ячейкой КТ, можно наблюдать незначительное плато на кривой заряда в области высоких напряжений, что может быть вызвано челночным эффектом, приводящим к снижению энергетической эффективности до 58,7% (рис. 3 б). Напротив, ячейка РШ в режиме гальваностатического заряда-разряда продемонстрировала удельную емкость 338 Ф/г и удельную энергию 24,8 Вт·ч/кг при энергетической эффективности 74,6%.

Можно предположить, что не только объем пор, но и диаметр пор должен быть шире для беспрепятственного движения ионов в порах. Однако слишком большой размер пор не способен сдерживать образующиеся йодиды внутри электрода из-за чего происходит миграция йодидов в объем электролита, снижая эффективности ячейки [20]. Отсюда следует, что эффективный размер пор положительного электрода для окислительно-восстановительной реакции йодидов должен составлять менее 3,5 нм. Из вышесказанного следует, что энергетическая эффективность ячеек РШ < 70% за счет более эффективного удержания

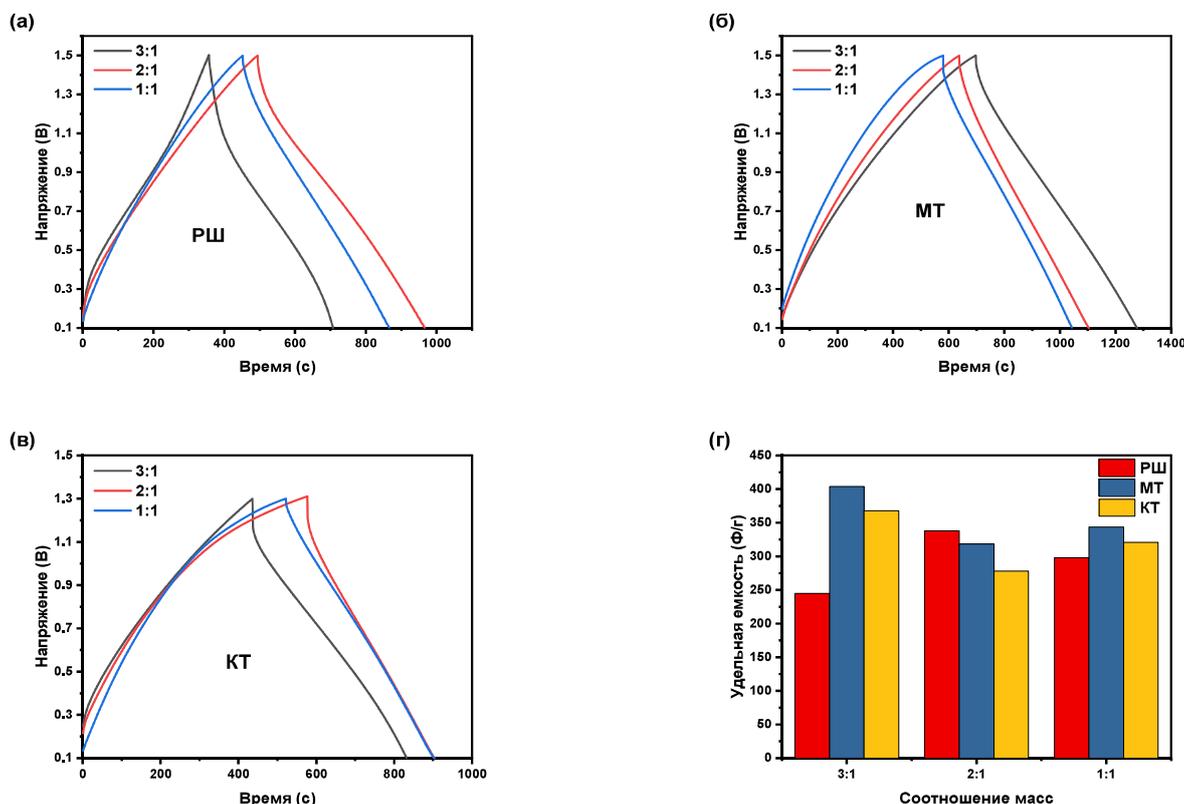
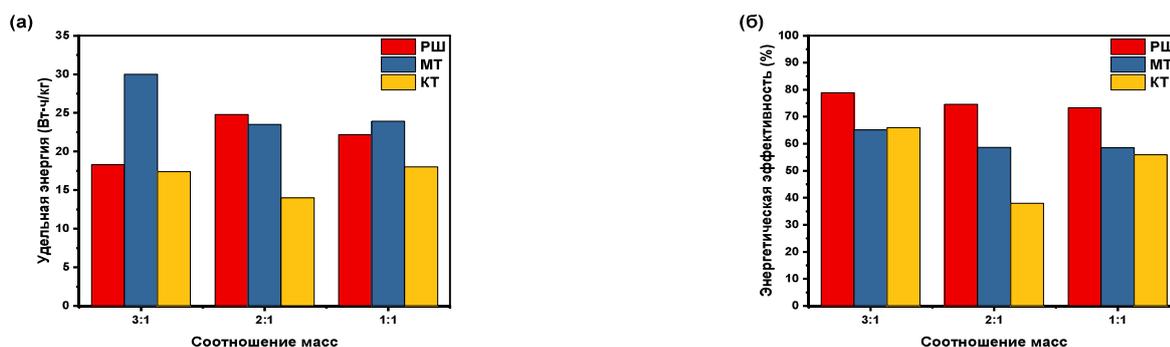


Рис. 2. ГЗР для ячеек (а) РШ, (б) МТ, (в) КТ и (г) соответствующие удельные емкости ячеек.



**Рис. 3.** Зависимость (а) удельной энергии и (б) энергетической эффективности от соотношения масс и материала положительного электрода ГСК.

полиидидов в пористой структуре, а энергетическая эффективность других ячеек не достигает 70%, что свидетельствует о сильном челночном эффекте.

#### 4. Заключение

В ходе данного исследования установлено, что пористая структура углеродных материалов играет ключевую роль в определении эффективности ГСК с водными редокс-активными электролитами. Оптимальный размер пор положительного электрода для эффективного удержания иодидов и предотвращения челночного эффекта составляет менее 3,5 нм. ГСК с положительным электродом МТ продемонстрировал высокие значения удельной емкости (403 Ф/г) и удельной энергии (30 Вт·ч/кг), однако его энергетическая эффективность оказалась невысокой. В то же время ячейка с электродом РШ с размерами пор менее 1 нм показала высокую энергетическую эффективность до 79%, что подчеркивает важность микропористой структуры для удержания продуктов редокс-реакции иодидов и минимизации потерь энергии. Таким образом, оптимизируя пористую структуру углеродных электродов, можно достичь оптимального баланса между удельной емкостью, удельной энергией и энергетической эффективностью. Полученные результаты подчеркивают важность дальнейших исследований, направленных на оптимизацию пористой структуры для создания высокоэффективных и экологически безопасных ГСК.

#### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту грантового финансирования ИРН AP19679624.

#### Список литературы

- [1]. Liu N., Huo K., McDowell M. et al. Rice husks as a sustainable source of nanostructured silicon for high performance Li-ion battery anodes // *Sci. Rep.* – 2013. – Vol. 3. – P. 1919.
- [2]. Simon P., Gogotsi Y. Materials for electrochemical capacitors // *Nat. Mater.* – 2008. – Vol. 7(11). – P. 845-54.
- [3]. Kim B.K., Sy S., Yu A., Zhang J. Handbook of clean energy systems // John Wiley & Sons, Ltd. – 2014. – P. 1-25.
- [4]. Conway B.E. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications. – New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [5]. Buiel E. Development of Lead-Carbon Hybrid Battery/Super capacitors // *Proc. Advanced Capacitor World Summit*. San Diego, CA, 2006. – P. 7-9.
- [6]. Yamazaki S., Ito T., Murakumo Y., Naitou M., Shimooka T., Yamagata M., Ishikawa M. Hybrid capacitors utilizing halogen-based redox reactions at interface between carbon positive electrode and aqueous electrolytes // *Journal of Power Sources*. – 2016. – Vol. 326. – P. 580-586.
- [7]. Gómez-Romero P., Ayyad O., Suárez-Guevara J., Muñoz-Rojas D. Hybrid organic-inorganic materials: From child's play to energy applications // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2010. – Vol. 14(11). – P. 1939-1945.
- [8]. Akinwolemiwa B., Wei C., Yang Q., Yu L., Xia L., Hu D., Peng C., Chen G.Z. Optimal utilization of combined double layer and Nernstian charging of activated carbon electrodes in aqueous halide supercapattery through capacitance unequalization // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2018. – Vol. 165. – P. A4067-A4076.
- [9]. Lu Z., Chang Z., Zhu W., Sun X. Beta-phased Ni(OH)<sub>2</sub> nanowall film with reversible capacitance higher than theoretical Faradic capacitance // *Chem Commun.* – 2011. – Vol. 47. – P. 9651.

- [10]. Lee J., Krüner B., Tolosa A., Sathyamoorthi S., Kim D., Choudhury S., Seo K.-H., Presser V. Tin/vanadium redox electrolyte for battery-like energy storage capacity combined with supercapacitor-like power handling // *Energy Environ. Sci.* – 2016. – Vol. 9. – P. 3392-3398.
- [11]. Senthilkumar S.T., Selvan R.K., Melo J.S. Redox additive/active electrolytes: a novel approach to enhance the performance of supercapacitors // *J. Mater. Chem. A.* – 2013. – Vol. 1. – P. 12386-12394.
- [12]. Zang X., Shen C., Sanghadasa M., Lin L. High-Voltage Supercapacitors Based on Aqueous Electrolytes // *ChemElectroChem.* – 2019. – Vol. 6(4). – P. 976-988. <https://doi.org/10.1002/celec.201801225>.
- [13]. Qin W., Zhou N., Wu C., Xie M., Sun H., Guo Y., Pan L. Mini-Review on the Redox Additives in Aqueous Electrolyte for High Performance Supercapacitors // *ACS Omega.* – 2020. – Vol. 5(8). – P. 3801-3808.
- [14]. Amiri M., Bélanger D. Physicochemical and Electrochemical Properties of Water-in-Salt Electrolytes // *ChemSusChem.* – 2021. – Vol. 14(12). – P. 2487-2500.
- [15]. Abbas Q., Nürnberg P., Ricco R., Carraro F., Gollas B., Schönhoff M. Less Water, Naked Choline and Solid Iodine for Superior Ecofriendly Hybrid Energy Storage // *Advanced Energy and Sustainability Research.* – 2021. – Vol. 2(12). – P. 2100115.
- [16]. Luo J., Xiao G., Ding D., Chong X., Ren J., Bai B. Pyrolysis mechanism of magnesium citrate nonahydrate and microstructural evolution during the process // *CeramicsInternational.* – 2021. – Vol. 47 (21). – P. 29607-29619.
- [17]. Lota G., Frackowiak E. Striking capacitance of carbon/iodide interface // *Electrochemistry Communications.* – 2009. – Vol. 11(1). – P. 87-90.
- [18]. Pavlenko V.V., Temirkulova K.M., Zakharov A.Yu., Aubakirov Y.A., Ayaganov Zh.E. Optimization of the Porous Structure of Carbon Electrodes for Hybrid Supercapacitors with a Redox Electrolyte Based on Potassium Bromide // *Eurasian Chemico-Technological Journal.* – 2024. – Vol. 25(4). – P. 201-210.
- [19]. Suo L.M., Borodin O., Gao T., Olguin M., Ho J., Fan X. L., Luo C., Wang C. S., Xu K. Water-in-salt» electrolyte enables high-voltage aqueous lithium-ion chemistries // *Science.* – 2015. – Vol. 350(6263). – P. 938–943.
- [20]. Shao Y., El-Kady M.F., Sun J., Li Y., et al. Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors // *Chemical Reviews.* – 2018. – Vol. 118(18). – P. 9233-9280.

## References

- [1]. Liu N, Huo K (2013) *Sci. Rep* 3: 1919 <https://doi.org/10.1038/srep01919>.
- [2]. Simon P, Gogotsi Y (2008) *Nat. Mater* 7(11): 845-54. <https://doi.org/10.1038/nmat2297>.
- [3]. Kim BK, Sy S, Yu A, Zhang J (2014) John Wiley & Sons, Ltd: 1-25. <https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces112>
- [4]. Conway BE (2013) *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*, New York: Springer Science & Business Media. ISBN: 978-1-4757-3060-9.
- [5]. Buiel E (2006) Development of Lead-Carbon Hybrid Battery/Super capacitors / *Proc. Advanced. Capacitor World Summit San Diego, CA* P. 7-9.
- [6]. Yamazaki S, Ito T, Murakumo Y, Naitou M, Shimooka T, Yamagata M, Ishikawa M (2016) *Journal of Power Sources* 326: 580-586. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.021>.
- [7]. Gómez-Romero P, Ayyad O, Suárez-Guevara J, Muñoz-Rojas D (2010) *Journal of Solid State Electrochemistry* 14(11): 1939-1945. <https://doi.org/10.1007/s10008-010-1076-y>.
- [8]. Akinwolemiwa B, Wei C, Yang Q, Yu L, Xia L, Hu D, Peng C, Chen GZ (2018) *Journal of The Electrochemical Society* 165: A4067-A4076. <https://doi.org/10.1149/2.0031902jes>
- [9]. Lu Z, Chang Z, Zhu W, Sun X (2011) *Chem Commun* 47: 9651-9653. <https://doi.org/10.1039/c1cc13796d>
- [10]. Lee J, Krüner B, Tolosa A, Sathyamoorthi S, Kim D, Choudhury S, Seo K-H, Presser V (2016) *Energy Environ. Sci* 9: 3392-3398. <https://doi.org/10.1039/C6EE00712K>.
- [11]. Senthilkumar ST, Selvan RK, Melo JS (2013) *J. Mater. Chem. A* 1: 12386-12394. <https://doi.org/10.1039/c3ta11959a>.
- [12]. Zang X, Shen C, Sanghadasa M, Lin L (2019) *ChemElectroChem* 6(4): 976–988. <https://doi.org/10.1002/celec.201801225>.
- [13]. Qin W, Zhou N, Wu C, Xie M, Sun H, Guo Y, Pan L (2020) *ACS Omega* 5(8): 3801-3808. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04063>.
- [14]. Amiri M, Bélanger D (2021) *ChemSusChem* 14(12): 2487-2500. <https://doi.org/10.1002/cssc.202100550>.
- [15]. Abbas Q, Nürnberg P, Ricco R, Carraro F, Gollas B, Schönhoff M (2021) *Advanced Energy and Sustainability Research* 2(12): 2100115. <https://doi.org/10.1002/aesr.202100115>.
- [16]. Luo J, Xiao G, Ding D, Chong X, Ren J, Bai B (2021) *CeramicsInternational* 47(21): P. 29607-29619. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.130>
- [17]. Lota G, Frackowiak E (2009) *Electrochemistry Communications* 11(1): 87-90. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2008.10.026>.

- [18]. Pavlenko VV, Temirkulova KM, Zakharov AYU, Aubakirov YA, Ayaganov ZhE (2024) Eurasian Chemico-Technological Journal 25(4): 201-210. <https://doi.org/10.18321/ectj1542>.
- [19]. Suo LM, Borodin O, Gao T, Olguin M, Ho J, Fan XL, Luo C, Wang CS, Xu K (2015) Science 350(6263): 938-943. <https://doi.org/10.1126/science.aab1595>.
- [20]. Shao Y, El-Kady MF, Sun J, Li Y (2018) Chemical Reviews 118(18): 9233–9280. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00252>.

### Көміртекті материалдарының кеуекті өлшемдерінің сулы тотығу-тотықсыздану электролиттегі гибриді суперконденсаторлардың сипаттамасындағы әсері

Ж.А. Супиева<sup>1,2\*</sup>, А.Ю. Захаров<sup>1</sup>, Ж.Е. Аяганов<sup>1,2</sup>, В.В. Павленко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к-сі, 172, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

### АНДАТПА

Бұл жұмыс көміртекті материалдардың кеуекті құрылымының гибриді суперконденсаторлардың сипаттамаларына 5M NaNO<sub>3</sub> + 0,5M NaI сулы тотықсыздандырғыш электролитінің әсерін зерттейді. Бұл мақсатқа жету үшін күріш қабығынан активтендірілген көмірді, магний цитратынан алынған көмірді және кремний диоксиді шаблонның пайдаланып дайындалған көміртекті қоса алғанда, үш түрлі көміртекті материалдар синтезделді. Оң электродтың кеуекті құрылымын оңтайландыру орташа мәні бар кеуек өлшемі 3,4 нм болатын оң электроды бар ұяшық үшін 0,5 А/г ток тығыздығы кезінде 403 Ф/г меншікті сыйымдылыққа және 30 Вт/кг меншікті энергияға қол жеткізуге мүмкіндік берді. Эксперименттік нәтижелер кеуектер мөлшері мен беттік ауданы йодты ұстау қабілетіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті, бұл өз кезегінде гибриді суперконденсатордың сыйымдылығы мен энергия тығыздығын анықтайды. Кеуектері 1 нм-ден аз белсендірілген көмірді пайдалану 79% жоғары энергия тиімділігіне қол жеткізуге мүмкіндік берді.

*Түйін сөздер:* кеуекті құрылым, гибриді конденсатор, йодидтер, қос электрлік қабат, энергия сақтау құрылғылары

### Effect of pore size of carbon materials on the performance of hybrid supercapacitors in aqueous redox electrolyte

Zh.A. Supiyeva<sup>1,2\*</sup>, A.Yu. Zakharov<sup>1</sup>, Zh.E. Ayaganov<sup>1,2</sup>, V.V. Pavlenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbai batyr str., Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, 71, Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

### ABSTRACT

This paper investigates the effect of the porous structure of carbon materials on the performance of hybrid supercapacitors using an aqueous redox electrolyte of 5M NaNO<sub>3</sub>+0.5M NaI. For this purpose, three different carbon materials including activated carbon from rice husk, carbon from magnesium citrate and carbon obtained using template silica were synthesized. Optimization of the porous structure of the positive electrode achieved a specific capacitance of 403 F/g and a specific energy of 30 W h/kg at a current density of 0.5 A/g for the positive electrode cell with an average pore size of 3.4 nm. Experimental results showed that the pore size and surface area significantly affect the iodide retention capacity, which in turn determines the capacitance and specific energy of the hybrid supercapacitor. The use of activated carbon with pores less than 1 nm allowed achieving a high energy efficiency of 79%.

*Keywords:* porous structure, hybrid capacitor, iodides, double electric layer, energy storage devices