



Физика, химия и науки о Земле

Journal homepage: www.icpes.ru



Вакуумная пропитка пористого углерода ионной жидкостью EMImBF₄ для повышения емкости суперконденсаторов

Воропай А.Н.^{1,*}, Лебедев И.Ю.¹, Гладышева А.В.¹

¹ Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия

* Автор для переписки: voropay@uni-dubna.ru (Воропай А.Н.).

DOI: _____

Поступила в редакцию 22.11.2025, принята к печати 29.11.2025, опубликована 27.12.2025

Ключевые слова:

суперконденсаторы; ионные жидкости; пропитка электродов

АННОТАЦИЯ

Суперконденсаторы представляют из себя перспективные системы накопления энергии, которые способны обеспечивать импульсное питание различных устройств. В последнее время они нашли широкое применение в энергетике для компенсации пиков и провалов напряжения длительностью несколько секунд. Также на мобильных системах их интенсивно используют для рекуперации энергии торможения. На сегодняшний день интерес представляет направление по повышению энергоемкости таких систем и одним из способов этого добиться является исследование новых электролитов, например, ионных жидкостей. Однако, такие электролиты обладают высокой вязкостью, что затрудняет пропитку электродов. Одним из способов решить эту проблему может быть использование давления при пропитке для повышения полноты проникновения электролита в поры электрода. В данной работе использовался углеродный материал Kuraray YP-50, электролитом выступала ионная жидкость 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate. Пропитка проводилась при давлении 10 атм. Эффект от пропитки исследовался электрохимическими методами и определялся по повышению емкости после пропитки. Показано, что после пропитки под давлением емкость повышается с 42 до 52 Ф/г, но при этом сопротивление также повышается с 955 до 1850 Ом при плотности тока 2.88 мкА/см².

ВВЕДЕНИЕ

Суперконденсаторы на сегодняшний день занимают промежуточное положение между аккумуляторами и конденсаторами на диаграмме Рагона [1-2] и применяются преимущественно в областях, где требуется импульсное питание. Принцип работы суперконденсаторов исходно был основан на явлении двойного электрического слоя [3-4], однако, на сегодняшний день в мире существуют технологии производства трех разных типов суперконденсаторов [5-7]: двойнослойные суперконденсаторы (или классические); псевдоконденсаторы (основанные на фарадеевских процессах, но имеющие зарядно-разрядные характеристики близкие к классическим); гибридные суперконденсаторы (суперконденсаторы, у которых один из электродов является фарадеевским). Развитие двухслойных конденсаторов движется на сегодняшний день в направлении повышения напряжения, т.к. увеличение напряжения значительно

повышает энергоёмкость суперконденсаторов [8-11]. Хорошим кандидатом для повышения рабочего напряжения может являться ионная жидкость (ИЖ) в качестве электролита [12], такие электролиты безопасны для окружающей среды в своем большинстве [13-14] и имеют высокое напряжение работы (до 5,5 В). В большинстве практических применений ИЖ смешивают с органическими растворителями для снижения вязкости чистых ИЖ и увеличения скорости пропускания ионов [15], который характеризуется коэффициентом диффузии. Введение органических растворителей в чистые ИЖ снижает ионную ассоциацию и влияет на его окислительно-восстановительный потенциал, что неизбежно приводит к уменьшению окна электрохимической стабильности электролита, тем самым ограничивая рабочее напряжение суперконденсатора. Чистая же ИЖ обладает высокой вязкостью и гидрофобностью по отношению к некоторым маркам угля [16] и это может создавать проблемы с полной пропиткой электрода. При этом пропитка нанопор крайне важна ввиду увеличения емкости устройства из-за повышения доли доступной поверхности для пор, которые немного больше размера иона [17].

На сегодняшний день рассматриваются разные ИЖ [18-20], но в данной работе мы сосредоточены на ИЖ 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate (EMImBF₄) [21-22]), т.к. данная ИЖ может использоваться при изготовлении суперконденсаторов с рабочей температурой до -70 °С [23], что расширяет применение суперконденсаторов на ИЖ по сравнению с классическими суперконденсаторами.

Использование давления для пропитки пористой структуры электрода в работах не встречается, однако исследователи уделяют внимание оптимизации пористой структуры [24-28], без которой емкость может заметно снизиться [29]. Но это не решает проблему высокой вязкости и в случае повышения графитизации углерода (что важно для повышения электрохимической стабильности), эта проблема может только усиливаться из-за снижения смачивания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Используемые материалы

В качестве углеродных материалов использовался пористый углеродный материал Kuraray YP-50 (Shandong Yunji Energy Technology Co. Ltd, Китай), в качестве связующего использовался PVDF, в качестве электропроводящей добавки использовался углерод С-45, в качестве растворителя использовался N-метилпирролидон (NMP) х.ч. (Gelon Energy Corp Lib Group Co. Ltd., Китай), в качестве ионных жидкостей (ИЖ) использовался 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate (Epoch Material Co. Ltd, Китай).

Изготовление образцов

Электроды изготавливались методом намазки на поверхность спейсеров из нержавеющей стали AISI 304 диаметром 15 мм и толщиной 0.5 мм. Суспензия для намазки была следующего состава: 87 % по массе пористого углеродного материала; 4.3 % по массе электропроводящей добавки; 8.7 % по массе связующего. Навеска связующего массой 0.3±0.05 г предварительно растворялась в 12 мл NMP при температуре 60-70 °С с использованием магнитной мешалки. После в раствор связующего добавлялись навески пористого углерода и электропроводящей добавки и перемешивались с использованием верхнеприводной мешалки с частотой 2400-2600 мин⁻¹ в течение 24 часов.

Далее суспензия с использованием ракеля наносилась на фольгу или спейсеры из нержавеющей стали (при этом спейсеры предварительно приклеивались с использованием 2-х стороннего скотча к поверхности алюминиевой фольги). Толщина покрытия составляла 700 мкм. После образцы высушивались в вакууме при температуре 120 °С в течение 48 часов. Таким образом получены рабочие электроды.

Перед внесением в инертный перчаточный бокс образцы взвешивались с использованием аналитических весов с точностью 0.1 мг и измерялась их толщина микрометром с точностью 1 мкм.

Далее электроды заносятся в инертный бокс. Образцы первого типа пропитывались электролитом (120 мкл на ячейку при этом электролит наносился на каждый рабочий электрод и на сепаратор в равных долях) и упаковывались в ячейки CR2032 в следующей последовательности: нижняя крышка / рабочий электрод / сепаратор Cell Gard 2500 / рабочий электрод / пружина / спейсер / верхняя крышка. Таким образом получен образец SC-0. Образец с пропиткой под давлением получен при предварительной пропитке в реакторе (рисунок 1), где сначала рабочие электроды в избытке электролита вакуумировали в течение 2 часов, а после подавали избыточное давление 10 атм с использованием баллона с сухим аргоном в течение 2 часов, после давление возвращалось к нормальному и проводилась упаковка в ячейки CR2032, как описано выше. Таким образом получен образец SC-10.

Электрохимические испытания

Исследование электрохимических характеристик проводилось в гальваностатическом режиме на потенциостате Elins P20X8 при токе 5 до 35 мкА. Диапазон напряжений от 0.0 до 0.3 В или ограничение по времени заряда-разряда по 500 с. Измерения проводились при температуре 30 °С. Энергия при заряде и разряде рассчитывались по формуле (1) из кривых заряда разряда. Данные об энергии использовались для расчета КПД по энергии (2). Электрический заряд при заряде и разряде рассчитывались по формуле (3) из кривых заряда разряда. Данные об электрическом заряде использовались для расчета КПД по заряду (4). КПД по напряжению рассчитывалось по формуле (5). Электрическое сопротивление рассчитывается двумя способами: по потере энергии по формуле (6) как в работе [30]; по падению напряжения при переключении с заряда на разряд по формуле (7). Удельная емкость определялась по формуле (8) [31].



Рисунок 1 - Фото ячейки для пропитки электродов

$$E = \int_0^t U(t)I(t)dt \quad (1)$$

$$\eta(E) = \frac{E_{Disch}}{E_{Ch}} \quad (2)$$

$$Q = \int_0^t I(t)dt \quad (3)$$

$$\eta(Q) = \frac{Q_{Disch}}{Q_{Ch}} \quad (4)$$

$$\eta(U) = \frac{\eta(E)}{\eta(Q)} \quad (5)$$

$$R(E) = \frac{(E_{Ch} - E_{Disch})}{I^2(t_{Ch} + t_{Disch})} \quad (6)$$

$$R(U) = \frac{U_{Ch} - U_{Disch}}{2I} \quad (7)$$

$$C = \frac{I\Delta t(m_1 + m_2)}{\Delta U m_1 m_2} \quad (8)$$

где E_{Disch} и E_{Ch} - это энергия разряда и заряда соответственно (Дж); t_{Disch} и t_{Ch} - это время разряда и заряда соответственно (с); I - это ток при котором происходит измерение (А); Q_{Disch} и Q_{Ch} - это электрические заряды разряда и заряда соответственно (Кл); $R(E)$ и $R(U)$ - электрическое сопротивление по энергии и падению напряжения соответственно (Ом); U_{Disch} и U_{Ch} - напряжение разряда и заряда соответственно (В); m_1 и m_2 - масса одного и второго рабочего электрода (г).

Исследование ионной жидкости

Съемка ИК-спектров проводилась на приборе SHIMADZU IRAffinity в диапазоне от 650 до 4000 см^{-1} с шагом 2 см^{-1} . Образец ионной жидкости выносился из инертного бокса с использованием инсулинового шприца, предварительно загерметизированного с использованием парафина. Ионная жидкость вынималась из шприца только перед съемкой ИК-спектров. Исследование содержания воды проводилось на титраторе Фишера (Metrohm 899 Coulometer). Как и при съемке ИК-спектров ИЖ выносилась из инертного бокса с использованием инсулинового шприца и помещалась в титратор, при этом проводилось предварительное взвешивание шприца с ИЖ и без ИЖ, для определения массы ИЖ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлены ИК-спектры ионной жидкости. В спектрах ИЖ EMImBF_4 можно наблюдать характерные для данного соединения линии на 754, 848, 1043, 1171, 1462 и 1570 см^{-1} , что близко к линиям данной ИЖ, как в работе [32]. Также на спектрах в районе 3000 см^{-1} наблюдается пик воды. Данные титрования по методу Фишера подтверждают наличие воды в составе электролита на уровне 0.51 масс%.

Кривые заряда разряда демонстрируют нелинейное поведение (рисунок 3). Нелинейность может демонстрировать фарадеевские процессы [33-35], однако при разборе ячеек не наблюдалось значительных следов коррозии и также не наблюдалось и больших потерь емкости при циклировании ячейки (рисунок 4). Нелинейность заряд-разрядных кривых в таком случае может быть связана с различными коэффициентами диффузии в микро и

мезопорах [36]. Возможно, сначала идет сорбция ионов на поверхности мезо и макропор (зона 1), а далее идет заполнение микропор (зона 2)

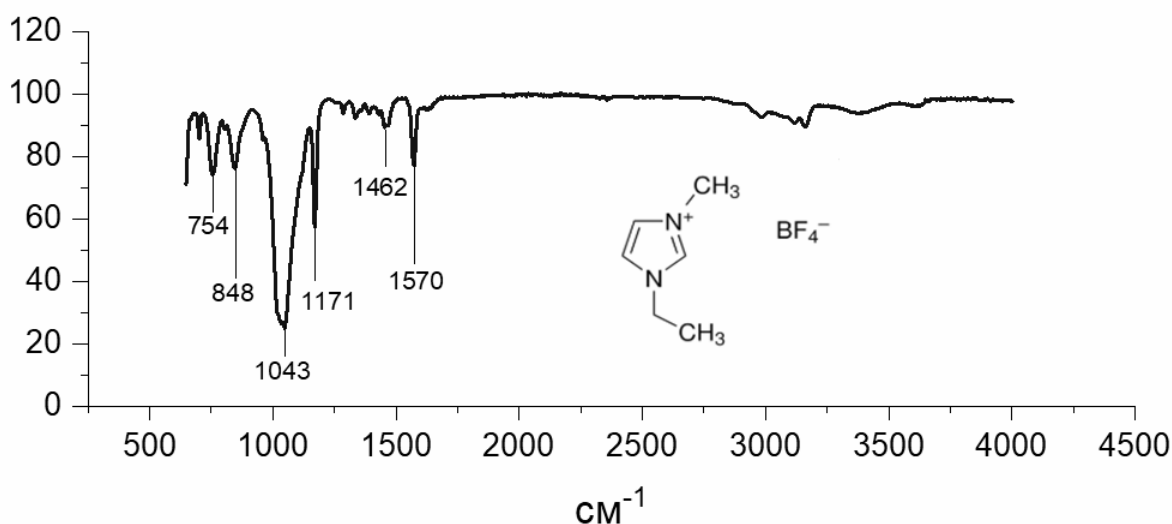


Рисунок 2 - ИК-спектры ионной жидкости

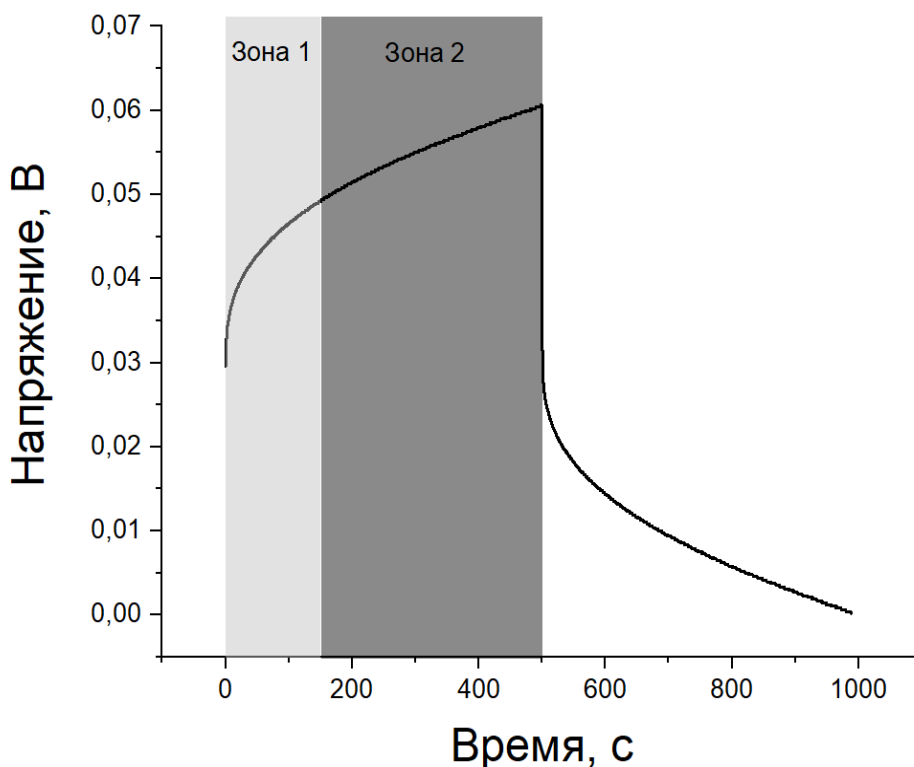


Рисунок 3 - Кривые заряда-разряда образца SC-10 при токе 15 мкА

При циклировании (рисунок 4) наблюдается снижение емкости, что связано с деградацией электрода [37] и постепенным снижением доступной удельной площади поверхности, однако мы не наблюдаем снижения КПД по энергии, как в работе [38] (аппроксимация кривых КПД от номера цикла имеет положительный коэффициент наклона, что демонстрирует рост КПД со временем), по видимому разрушение электрода не связано с повышением его электрического сопротивления (значения сопротивления приведенные на рисунке 4 демонстрируют снижение его значения). Также коррозия, связанная с разрушением материала, должна приводить к значению КПД по заряду менее 1, но при циклировании КПД остается близким к 1 ($\eta(Q) = 1 \pm 0.0005$) во всем диапазоне циклирования, это свидетельствует, что на поверхности электрода не протекают побочные электрохимические реакции.

Пропитка под давлением должна давать увеличение доли поверхности, участвующей в накоплении заряда, что должно проявляться в повышении емкости после пропитки под давлением. Данный эффект наглядно демонстрируется на кривых зависимости удельной емкости от плотности рабочего тока (рисунок 5). Видно, что емкость образца после пропитки больше во всем диапазоне плотностей тока, чем для исходного образца. Также для образца после пропитки ожидалось, что его емкость с повышением плотности тока будет убывать быстрее ввиду того,

что транспорт из пор меньшего размера труднее [16], однако на кривых разрядной емкости такого эффекта практически не наблюдается (рисунок 5а), но этот эффект наблюдается на кривых зарядной емкости (рисунок 5б).

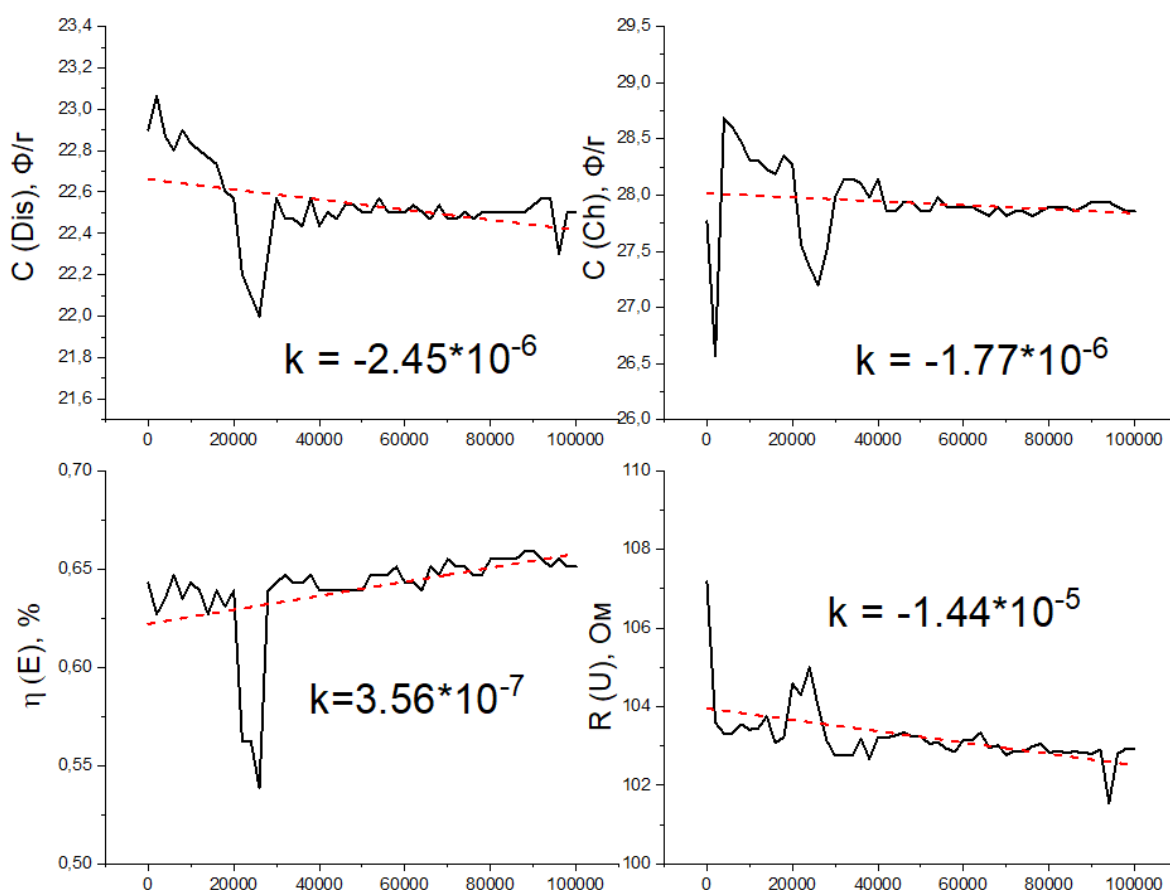


Рисунок 4 - Кривые удельной емкости при заряде (Ch) и разряде (Dis), КПД по энергии и сопротивление R(U) при токе 35 мкА для SC-0

Более наглядно эффект пропитки наблюдается в изменении сопротивления, рассчитанном по потери энергии (таблица 1). При этом повышение сопротивления скорее всего связано с проблемами транспорта ионов из пор меньшего размера. Энергия на транспорт ионов из пор напрямую связана с напряжением и должна проявляться в КПД по напряжению

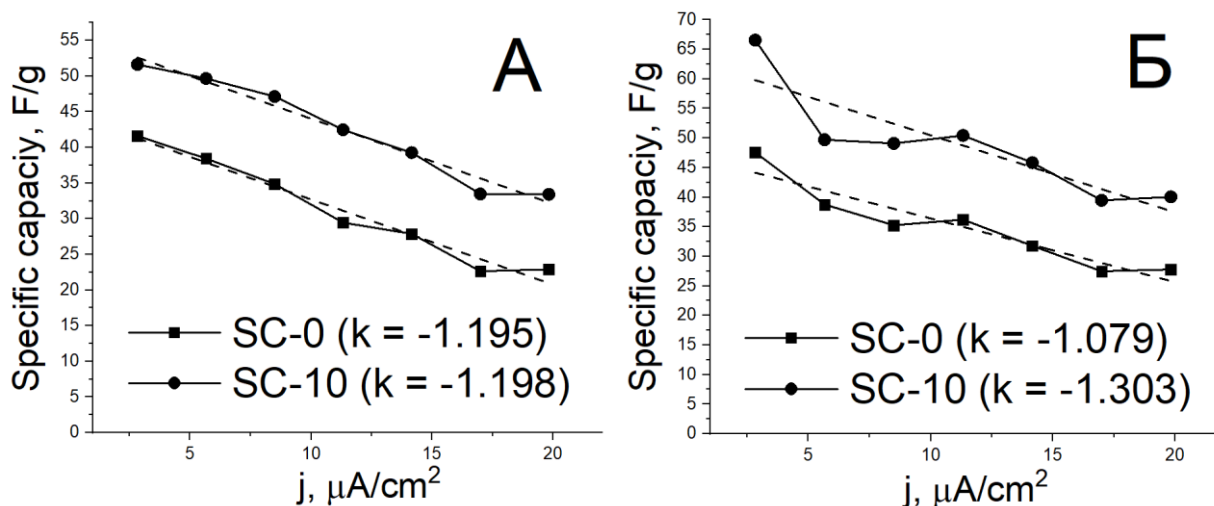


Рисунок 5 - Кривые зависимости удельной емкости от плотности тока: а) при разряде; б) при заряде

Таблица 1 - Параметры образцов при разной плотности тока

Плотность тока, мкА/см ²	SC-0		SC-10	
	R(E), Ом	η (U)	R(E), Ом	η (U)
2.83	955	0.870	1850	0.209
5.66	450	0.787	1521	0.189
8.49	411	0.709	1463	0.172
11.32	665	0.750	1711	0.335
14.15	518	0.745	1568	0.327
16.99	531	0.770	1587	0.350
19.82	535	0.773	1595	0.369

Если рассматривать электрод как модель из большого числа конденсаторов и сопротивлений [39-41], то по мере повышения плотности тока будет уменьшаться и доля поверхности участвующей в формировании емкости. Скорее всего первой должна “выключаться” поверхность микропор, т.к. транспорт ионов в поры меньшего размера связан с большими затратами энергии, чем транспорт в поры большего размера. Ввиду этого мы наблюдаем повышение КПД по напряжению для образца после пропитки. И этот рост намного быстрее, чем для образца с классической пропиткой, где КПД по напряжению наоборот падает из-за повышения омических потерь.

В образце SC-10 с повышением плотности тока омические потери также увеличиваются, но по всей видимости они компенсируются эффектом “выключения” их из общей емкости при повышении плотности тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе рассмотрено влияние избыточного давления при пропитке на емкость электродов на основе пористого углеродного материала. Показано, что пропитка под давлением в 10 атм приводит к повышению удельной разрядной емкости по сравнению с классической пропиткой с 41.6 до 51.6 Ф/г для плотности тока 2.83 мкА/см² и с 22.9 до 33.4 Ф/г для плотности тока 19.82 мкА/см². При этом у образца кратно повышается сопротивление, рассчитанное по величине потери энергии с 535-955 до 1463-1850 Ом для образца SC-0 (получен классической пропиткой) и образца SC-10 (получен пропиткой под давлением) соответственно. Также наблюдается сильное снижение КПД по напряжению при применении пропитки под давлением (более чем в 2 раза КПД снижается), что свидетельствует о больших затратах энергии именно на транспорт ионов в порах электрода, что видимо и является следствием более глубокой пропитки пор меньшего размера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Guorui Ren, Jinfu Liu, Jie Wan, Yufeng Guo, Daren Yu. Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions. *Applied Energy*. 2017;204:47-65.
- [2]. Voicu I., Louahlia H., Gualous H., Gallay R. Thermal management and forced air-cooling of supercapacitors stack. *Appl Therm Eng*. 2015;85:89-99.
- [3]. Conway B.E. Transition from "supercapacitor" to "battery" behavior in electrochemical energy storage. *J Electrochem Soc*. 1991;138(6):1539.
- [4]. Becker H.I. Low voltage electrolytic capacitor. US 2800616, 1957.
- [5]. Loganathan N.N., Perumal V., Pandian B.R., Atchudan R., Immanuel Edison T.N.J., Ovinis M. Recent studies on polymeric materials for supercapacitor development. *J Energy Storage*. 2022;49:104149.
- [6]. He X., Zhang X. A comprehensive review of supercapacitors: Properties, electrodes, electrolytes and thermal management systems based on phase change materials. *J Energy Storage*. 2022;56C:106023.
- [7]. Huang J., Xie Y., You Y., Yuan J., Xu Q., Xie H., Chen Y. Rational design of electrode materials for advanced supercapacitors: from lab research to commercialization. *Adv Funct Mater*. 2023;33(14):2213095.
- [8]. А. Н. Воропай, Ю. В. Суровикин, И. В. Резанов. Исследование влияния условий пробоподготовки на удельную емкость пористого углеродного материала. *Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна»*. Серия «Естественные и инженерные науки». 2018;(40):3-8.
- [9]. А. Н. Воропай, Ю. В. Суровикин, И. В. Резанов. Исследование электрохимического поведения ионной жидкости с пористыми углеродными материалами на основе технического углерода. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018;6(2):165-170.

- [10]. Yoo J. Ionic Liquid for High Voltage Supercapacitor. *Supercapacitors - Theoretical and Practical Solutions*. InTech; 2018. P. 23-50.
- [11]. Wenbin Fu, Kostiantyn Turcheniuk, Olga Naumov, Roman Mysyk, Fujia Wang, Michael Liu, Doyoub Kim, Xiaolei Ren, Alexandre Magasinski, Minghao Yu, Xinliang Feng, Zhong Lin Wang, Gleb Yushin. *Materials and technologies for multifunctional, flexible or integrated supercapacitors and batteries*. *Materials Today*. 2021;48:176-197
- [12]. Béguin F., Presser V., Balducci A., Frackowiak E. *Carbons and electrolytes for advanced supercapacitors*. *Adv Mater*. 2014;26:2219-2251.
- [13]. Deschamps M., Gilbert E., Azais P., Raymundo-Piñero E., Ammar M.R., Simon P., et al. Exploring electrolyte organization in supercapacitor electrodes with solid-state NMR. *Nat Mater*. 2013;12(4):351-358.
- [14]. Romero A., Santos A., Tojo J., Rodríguez A. Toxicity and biodegradability of imidazolium ionic liquids. *J Hazard Mater*. 2008;151:268-273.
- [15]. Galiński M., Lewandowski A., Stępiak I. Ionic liquids as electrolytes. *Electrochim Acta*. 2006;51(26):5567-5580.
- [16]. Bettini L.G., Galluzzi M., Podestà A., Milani P., Piseri P. Planar thin film supercapacitor based on cluster-assembled nanostructured carbon and ionic liquid electrolyte. *Carbon*. 2013;59:212-220.
- [17]. Largeot C., Portet C., Chmiola J., Taberna P.-L., Gogotsi Y., Simon P. Relation between the Ion Size and Pore Size for an Electric Double-Layer Capacitor. *J Am Chem Soc*. 2008;130(9):2730-2731.
- [18]. Wang L., Chen X., Li M., Zhang K., Yang H. Advanced gel polymer electrolytes for flexible supercapacitors: Recent progress and future perspectives. *Next Energy*. 2025;100228.
- [19]. Martins V.L., Obana T.T., Torresi R.M. Electroactivity of 3D conducting polymers in water-in-salt electrolyte and their electrochemical capacitor performance. *J Electroanal Chem*. 2021;880:114822.
- [20]. [Y., Wang C., Li J., Liu H., Zhang X. A comprehensive review on supercapacitor electrolytes: Materials, mechanisms and design strategies for enhanced performance. *Journal of Energy Storage*. 2024;95:112487.
- [21]. Shamsipur M., Miran Beigi A.A., Teymouri M., Pourmortazavi S.M., Irandoust M. Physical and electrochemical properties of ionic liquids 1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate, 1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate and 1-butyl-1-methylpyrrolidinium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide. *J Mol Liq*. 2010;157:43-50.
- [22]. Barrado E., Couto R.A.S., Quinaz M.B., Lima J.L.F.C., Castrillejo Y. Electrochemical behaviour of ferrocene in the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate, EMIMBF₄, at 298K. *J Electroanal Chem*. 2014;720-721:139-146.
- [23]. Lu X., Vicent-Luna J.M., Calero S., Madero-Castro R.M., Gutiérrez M.C., Ferrer M.L., et al. EMIMBF₄ in ternary liquid mixtures of water, dimethyl sulfoxide and acetonitrile as "tri-solvent-in-salt" electrolytes for high-performance supercapacitors operating at -70 °C. *Energy Storage Mater*. 2021;40:368-385.
- [24]. Wang X., Li Y., Lou F., Buan M.E.M., Sheridan E., Chen D. Enhancing capacitance of supercapacitor with both organic electrolyte and ionic liquid electrolyte on a biomass-derived carbon. *RSC Adv*. 2017;7(38):23859-23865.
- [25]. Zhang S., Brahim S., Maat S. High-voltage operation of binder-free CNT supercapacitors using ionic liquid electrolytes. *J Mater Res*. 2018;33(9):1179-1188.
- [26]. Antonietti M., Chen X., Yan R., Oschatz M. Storing electricity as chemical energy: beyond traditional electrochemistry and double-layer compression. *Energy Environ Sci*. 2018;11:3069-3074.
- [27]. Yan R., Antonietti M., Oschatz M. Toward the experimental understanding of the energy storage mechanism and ion dynamics in ionic liquid based supercapacitors. *Adv Energy Mater*. 2018;8(18):1800026.
- [28]. Zaccagnini P., Serrapede M., Armandi M., Bianco S., Carminati S., Zampato M., et al. A high-temperature high-pressure supercapacitor based on ionic liquids for harsh environment applications. *Electrochim Acta*. 2023;447:142124.
- [29]. М.Ю. Измайлова, К.К. Деньщиков, В.Т. Новиков. Применение ионных жидкостей в качестве электролита электрохимического двойнослойного суперконденсатора. *Альтернативная энергетика и экология*. 2009;11:109-113.
- [30]. Komarov V.A., Voropay A.N., Il'ina M.N., Goryacheva T.V. Research of Nanostructured Carbon Felt Materials as Electrodes of Vanadium Flow Batteries. *Russ J Electrochem*. 2021;57(8):892-897.
- [31]. Zhou Y., Ren X., Du Y., Jiang Y., Wan J., Ma F. In-situ template cooperated with urea to construct pectin-derived hierarchical porous carbon with optimized pore structure for supercapacitor. *Electrochim Acta*. 2020;355:136801.
- [32]. Shestakov A.F., Yudina A.V., Tulibaeva G.Z., Shul'ga Y.M., Ignatova A.A., Yarmolenko O.V. Effect of adding ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate on the coordination environment of Li⁺ ions in propylene carbonate, according to data from IR spectroscopy and quantum chemical modeling. *Russ J Phys Chem A*. 2017;91:1444-1450.
- [33]. Volkovich Y.M., Bograchev D.A., Mikhailin A.A., Bagotsky V.S. Supercapacitor carbon electrodes with high capacitance. *J Solid State Electrochem*. 2014;18:1351-1363.
- [34]. Voropay A.N., Surovikin Y.V., Rezanov I.V. Electrochemical studies of modified carbon black in supercapacitors. *AIP Conf Proc*. 2019;2143:020048.
- [35]. Voropay A.N., Ilyina M.N., Surovikin Y.V., Lavrenov A.V. Properties of a supercapacitor electrode containing a modified carbon black. *AIP Conf Proc*. 2020;2301:040017.
- [36]. Esarev I.V., Agafonov D.V., Surovikin Y.V., Nesov S.N., Lavrenov A.V. On the causes of non-linearity of galvanostatic charge curves of electrical double layer capacitors. *Electrochim Acta*. 2021;390:138896.
- [37]. Pamaté E., Köps L., Kreth F.A., Pohlmann S., Varzi A., Brousse T., et al. The Many Deaths of Supercapacitors: Degradation, Aging, and Performance Fading. *Adv Energy Mater*. 2023;13(29):2301008.
- [38]. А. Н. Воропай, Ю. В. Суrowикин, А. В. Лавренов. Исследование стабильности технического углерода при циклировании в гальваностатическом режиме. *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология* 2020;(1-6):84-92

- [39]. Н. А. Секушин. Свойства диффузионных импедансов Варбурга и Геришера в области низких частот. Известия Коми научного центра УРО РАН. 2010;(4):21-27.
- [40]. Halper M.S., Ellenbogen J.C. Supercapacitors: A Brief Overview. The MITRE Corporation, McLean, Virginia, USA; 2006. P. 1-29.
- [41]. Sedlakova V., Sikula J., Majzner J., Sedlak P., Kuparowitz T., Buergler B., Vasina P. Supercapacitor equivalent electrical circuit model based on charges redistribution by diffusion. J Power Sources. 2015;286:58-65.

Vacuum impregnation of porous carbon with EMIMBF₄ ionic liquid to increase the capacity of supercapacitors

Voropay A.N.^{1,*}, Lebedev I.Yu.¹, Gladysheva A.V.¹

¹ Dubna State University, Dubna, Russia

* The author for correspondence: voropay@uni-dubna.ru (Voropay A.N).

DOI: _____

Article history:

Received 22.11.2025 Received in revised form 29.11.2025 Accepted XX.XX.2025

Keywords:

Supercapacitors, ionic liquids,
electrode impregnation

ABSTRACT

Supercapacitors are promising energy storage systems capable of providing pulsed power to various devices. Recently, they have found widespread application in the power industry to compensate for voltage peaks and dips lasting several seconds. They are also widely used in mobile systems for braking energy recovery. Increasing the energy capacity of such systems is currently of interest, and one approach to achieving this is the study of new electrolytes, such as ionic liquids. However, such electrolytes are highly viscous, making electrode impregnation difficult. One solution to this problem may be to use pressure during impregnation to enhance the complete penetration of the electrolyte into the electrode pores. In this study, Kuraray YP-50 carbon material was used, with 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate as the electrolyte. Impregnation was performed at a pressure of 10 atm. The effect of impregnation was studied using electrochemical methods and determined by the increase in capacitance after impregnation. It is shown that after pressure impregnation, the capacitance increases from 42 to 52 F/g, but the resistance also increases from 955 to 1850 Ohm at a current density of 2.88 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.
