

К. т. н. І. В. СЕМКІВ, к. ф.-м. н. В. М. ВАЩИНСЬКИЙ, к. ф.-м. н. А. І. КАШУБА,  
д. ф.-м. н. Г. А. ІЛЬЧУК, к. ф.-м. н. М. В. СОЛОВЙОВ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: v.vashchynskyi@gmail.com

## ВПЛИВ ПРИРОДИ ЕЛЕКТРОЛІТУ НА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

*Методами імпедансної спектроскопії та вольтамперометрії досліджено поведінку конденсаторних систем на основі пористих вуглецевих матеріалів у водних і органічних розчинах електролітів. Встановлено, що катіони  $K^+$  та  $TEA^+$  входять в пори матеріалу в сольватованому стані, причому розміри іонів  $K^+$  менші, ніж  $TEA^+$ . Розміри аніонів  $BF_4^-$  менші, ніж катіонів неводних електролітів. Завдяки цьому ємність електрохімічних конденсаторів на основі водних розчинів електролітів є більшою за ємність відповідних джерел живлення в апротонному розчині електроліту.*

*Ключові слова: конденсаторні системи, пористий вуглецевий матеріал, водний та органічний електроліт, ємність.*

Серед систем накопичення енергії одними з найпоширеніших є суперконденсатори, також відомі як електрохімічні конденсатори (ЕК), вони використовуються в різноманітних портативних пристроях, електромобілях, стаціонарних системах накопичення енергії тощо. Порівняно з іншими системами накопичення енергії, такими як батареї та звичайні конденсатори, суперконденсатори мають три основні переваги: високу питому потужність, тривалий термін використання та швидкі процеси зарядки/розрядки, що робить перспективними подальше їх застосування [1].

Накопичення енергії суперконденсаторів відбувається за двома механізмами: перший — подвійна електрична ємність, створена електростатичним тяжінням між іонами та поверхнею зарядженого електрода (вуглецеві матеріали); другий — псевдоємність, що виникає в результаті швидкого оборотного окислення/відновлення на поверхні електрода [2]. Тобто очевидно, що основними робочими складовими суперконденсаторів є електроліти та електроди, які виготовляють з пористих вуглецевих матеріалів (інша назва — карбони) [3]. Відповідно, експлуатаційні характеристики суперконденсаторів сильно залежать від фізико-хімічних властивостей використовуваних електродних матеріалів. Пористі вуглецеві матеріали (ПВМ) отримують з біомаси, і їх використання зумовлено наявністю вуглецевого елемента та добре орієнтованих каналів, що робить ПВМ здатними швидко транспортувати іони під час застосування електрохімічного заряду/розряду [4—6]. Крім того, наявність мікропор у вуглецевих матеріалах може значно збільшити питому поверхню, що відіграє ключову роль у підвищенні питомої ємності.

Одним із найважливіших факторів, який визначає ефективність роботи ЕК, є вид електроліту — вод-

ний чи неводний. Використання неводних електролітів для електрохімічних конденсаторів має величезну перевагу через збільшення робочої напруги, оскільки діапазон електрохімічної стабільності таких електролітів значно ширший. Слід зазначити, що ємність ЕК залежить головним чином від ємності (вираженої у Ф/г), яка забезпечується електродним матеріалом, в той час як напруга й опір такого пристрою залежать від виду електроліту [7].

Широке застосування суперконденсаторів в різноманітних галузях, зокрема як накопичувачів енергії у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів, викликає необхідність покращення їхніх енергетичних параметрів. Ця робота присвячується вивченню кінетики перебігу електрохімічних процесів на межі «вуглецевий електрод — електроліт» і встановленню впливу природи електролітів на ємність електрохімічних конденсаторів, сформованих на основі пористих вуглецевих матеріалів.

### Зразки та методика досліджень

Для дослідження використовували пористий вуглецевий матеріал, виготовлений у National Institute of Coal (Ов'єдо, Іспанія), з присвоєною йому назвою CSTR-36В.

До складу катодної суміші увіходили активоване вугілля та зв'язувальна добавка (полівінілденотфторид), масова доля яких становила 95 та 5 % відповідно. Для виготовлення катодів нарізали нікелеву сітку відповідної форми площею  $0,5 \text{ см}^2$  і зважували її. В цю сітку загортали суміш та пресували її під тиском  $50 \text{ кг/см}^2$ , після чого встановлювали масу виготовленого електрода. Маса активного матеріалу не перевищувала 3 мг.

Електролітом слугував 30%-вий водний розчин гідроксиду калію (КОН) і 0,7-молярний (0,7М) роз-

чин тетрафторборату тетраетиламонію ( $[\text{C}_2\text{H}_5]_4\text{NBF}_4$ ) в ацетонітрилі ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ). Електродний потенціал розраховувався відносно стандартного водневого електрода порівняння.

До виготовлених електродів за допомогою зварювального апарату приварювали струмовиводи. Електрохімічні вимірювання проводили за дво- та триелектродною схемами з хлорсрібним електродом порівняння.

Імпедансні спектри (в діапазоні частот  $5 \cdot 10^{-3}$  —  $5 \cdot 10^5$  Гц) в потенціостатичних умовах, циклічні вольтамперограми та гальваностатичні заряд-розрядні цикли записувались за допомогою вимірювального комплексу “AUTOLAB” фірми “ECO CHEMIE” (Нідерланди), укомплектованого комп’ютерними програмами FRA-2 та GPES.

### Результати досліджень та їх обговорення

Із метою виявлення протікання можливих хімічних реакцій, які вносять вклад у загальну ємність конденсаторних систем, проводились потенціодинамічні дослідження в області потенціалів  $U = 0$ —1 В. На **рис. 1** представлені циклічні вольтамперограми вуглецевих матеріалів у 30%-му водному розчині КОН.

Форма вольтамперограм не вказує на будь-яку псевдоємнісну поведінку досліджених електрохімічних комірок, оскільки на них не спостерігається піків редокс-реакцій в заданому діапазоні напруги. Загальний характер потенціодинамічних залежностей є типовими для електрохімічних конденсаторів, що працюють за принципом заряду/розряду подвійного електричного шару (ПЕШ). Форма наведеної на рис. 1 залежності, отриманої для двоелектродної електрохімічної комірки, свідчить про квазіоборотність заряду/розряду ПЕШ. На вольтамперограмах відсутня наявність гострих максимумів. Проте, судячи з форми отриманої циклічної вольтамперограми, можна сказати, що до досягнення певно-

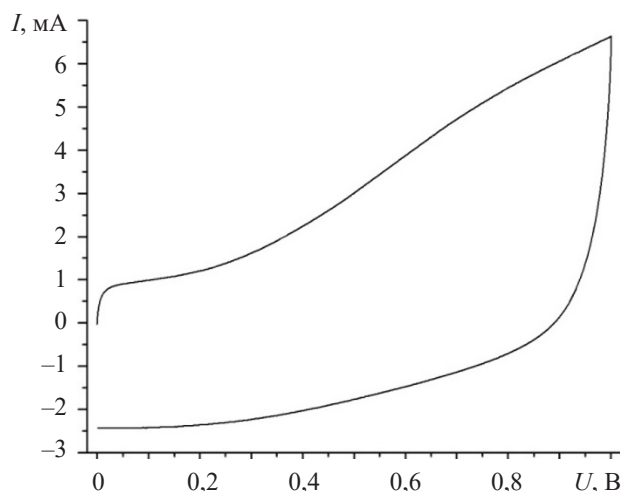


Рис. 1. Вольтамперограми електрохімічних комірок на основі електродів з CSTR-36 у 30%-му водному розчині КОН

го потенціалу — потенціалу розблокування фарадеєвського перенесення ОН-груп через межу розділу «електрод — електроліт» — значення струму, а відповідно і ємності, практично не залежить від потенціалу, що являє собою класичний симетричний суперконденсатор. У цьому випадку ємність забезпечується ємністю ПЕШ, сформованого іонами  $\text{K}^+$  на поверхні вуглецю [8]. В області значень потенціалу, більшого за потенціал розблокування, значну роль починають відігравати фарадеєвські редокс-реакції накопичення іонів на поверхні вуглецевого матеріалу, при цьому можна припустити можливість процесу входження цих груп всередину пор матеріалу електрода.

Одним із важливих параметрів ЕК є кулонівська ефективність — це відношення величин розрядної ємності до зарядної, яке характеризує відповідність режимів розряду до потужнісних можливостей суперконденсаторів та може вказувати на наявність побічних хімічних і електрохімічних реакцій [9]. Дослідження показало, що у водному і органічному електролітах криві гальваностатичних циклів заряджання/розряджання ЕК є однотипними (**рис. 2**).

Отримані з гальваностатичних досліджень результати дозволили розрахувати ємність з розрядної частини кривої циклу за допомогою рівняння

$$C = (2I \Delta t) / (m \Delta U),$$

де  $C$  — питома ємність;

$I$  — струм (заряду/розряду);

$\Delta t$  — час розряду електрохімічної комірки.

$m$  — активна маса електрода;

$\Delta U$  — спад напруги при замиканні розрядного кола,  
 $\Delta U = U_{\text{max}} - U_{\text{drop}}$ ;

$U_{\text{max}}$  — максимальне значення зарядної напруги;

$U_{\text{drop}}$  — спад напруги при сталому струмі, викликаний внутрішнім опором електрохімічної системи.

Для цього зразка спостерігався лінійний спад ємності у разі збільшення розрядного струму. Окрім того, вже після двох “тренувальних” циклів наставало типове ємнісне накопичення заряду з кулонівською ефективністю, не нижчою за 97%, яка практично не змінювалась впродовж експерименту. Це свідчить про те, що досліджуваний матеріал забезпечує стабільність конденсаторних систем та довговічність конденсатора. Максимальне значення питомої ємності для ПВМ у 30%-му КОН становить 125 Ф/г та пов’язане із забезпеченням достатнього часу для формування ПЕШ іонами  $\text{K}^+$  на поверхні матеріалу електрода та протікання фарадеєвських реакцій накопичення ОН-груп на поверхні вуглецю. В органічному електроліті значення ємності дорівнює 101 Ф/г. Такі результати для великих за розмірами молекул органічного електроліту задовільно корелюють як з більшим значенням найбільш ймовірного розміру пор, так і з частковою присутністю мікророзмірних пор.

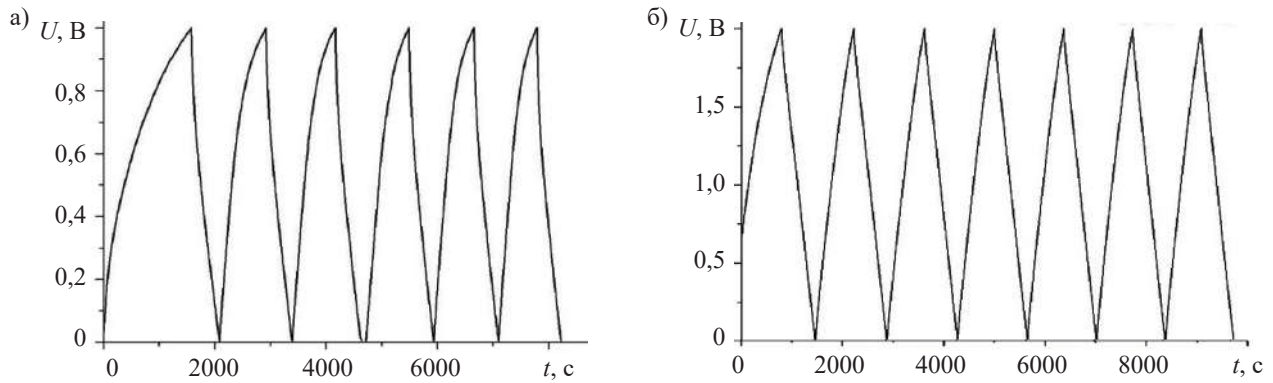


Рис. 2. Гальваностатичні цикли заряду/розряду електродів з CSTR-36 у 30%-му водному розчині KOH (а) та у 0,7М-розчині  $[C_2H_5]_4NBF_4$  в ацетонітрилі (б)

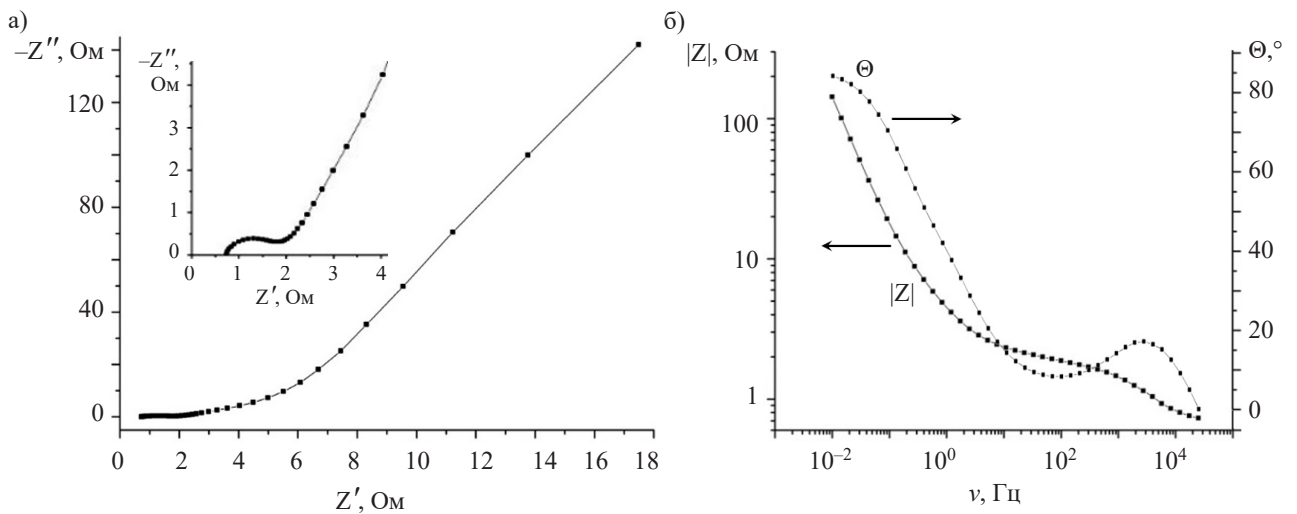


Рис. 3. Діаграми Найквіста (а) та Бодє-діаграми (б) для електродів з CSTR-36 у 30%-му водному розчині KOH

Для вивчення електрохімічних процесів на межі розділу «ПВМ — електроліт» використано метод електрохімічної імпедансної спектроскопії, який дозволяє детальніше встановити взаємозв'язок між внутрішньою структурою електродного вуглецевого матеріалу та його поведінкою у водному розчині електроліту. Цей метод є найбільш доцільним для розв'язання вказаної вище задачі, оскільки дає можливість проводити дослідження в досить широкому інтервалі частот ( $\nu = 10^{-3} — 10^6$  Гц) [10].

Частотні залежності комплексного імпедансу аналізувалися графічно-аналітичним методом в середовищі програмного пакета ZView 2.3 (Scribner Associates). Адекватність побудованих імпедансних моделей пакета експериментальних даних була підтверджена повністю випадковим характером частотних залежностей залишкових різниць першого порядку [11]. Значення ємностей для побудови вольт-фарадних залежностей визначалися з точністю 2—8% (коефіцієнт Крамера-Кроніга, що дозволив врахувати зміни фазового кута  $\Theta$  при моделюванні годографів імпедансу, був в межах  $10^{-6} — 10^{-5}$ ).

Досліджуваний матеріал CSTR-36 у 30%-му водному розчині KOH демонструє яскраво виражений

ємнісний процес у подвійному електричному шарі межі його розділу з електролітом (рис. 3). Такий результат добре моделюється електричною еквівалентною схемою моделі де Леві [12]. Проте на годографах імпедансу спостерігаються процеси накопичення енергії, що не можна віднести до ємнісного механізму. Це пов'язано зі зростанням товщини області просторового заряду (ОПЗ), і можна припустити, що проблема пов'язана з шунтуванням гелмгольцевої ємності ємністю ОПЗ карбону. А значить, в такому випадку моделювання необхідно базувати на схемі де Леві, модифікованій послідовно приєднаною (у відповідності до підходу Войта) паралельною ланкою  $C_{SC} — R_{SC}$  (рис. 4). Наявність височастотних дуг на годографах імпедансу, як правило, пояснюється наявністю закритих з однієї сторони пор [11].

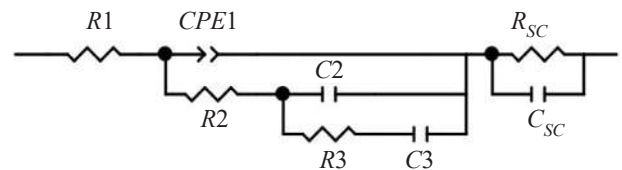


Рис. 4. Електрична еквівалентна схема для моделювання діаграм Найквіста

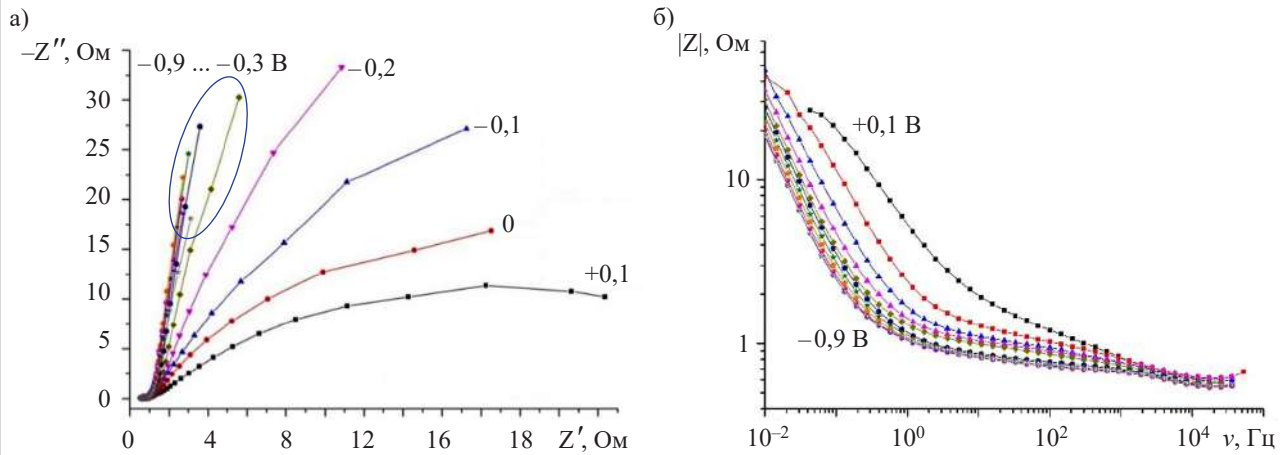


Рис. 5. Діаграми Найквіста (а) та Бодє-діаграми (б, в) для електродів з CSTR-36 у 0,7М-розчині  $[C_2H_5]_4NBF_4$  в ацетонітрилі, отримані в діапазоні зміни потенціалу від +0,1 до -0,9 В з кроком 0,1 В

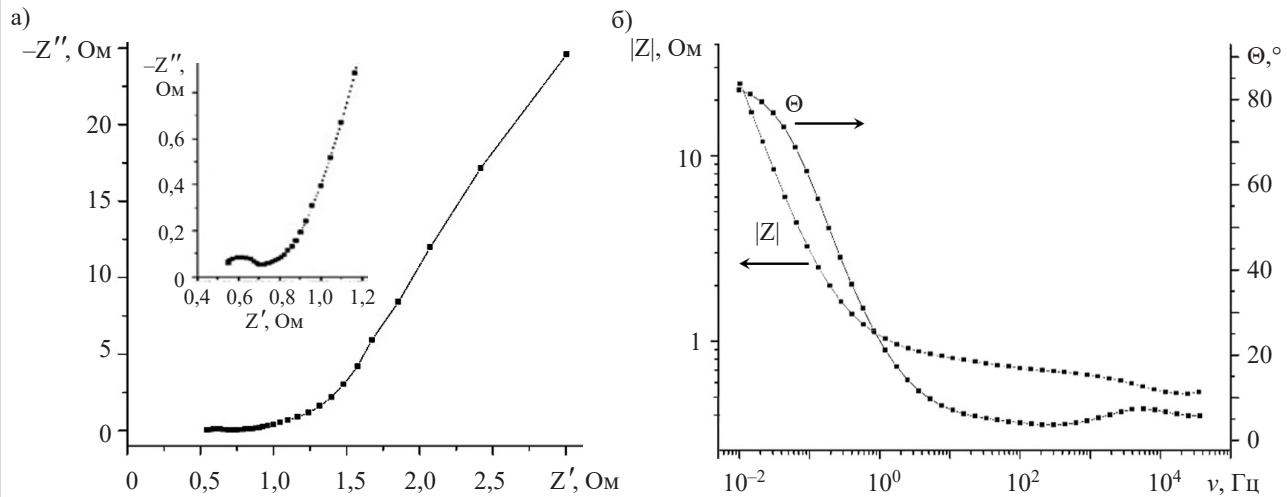
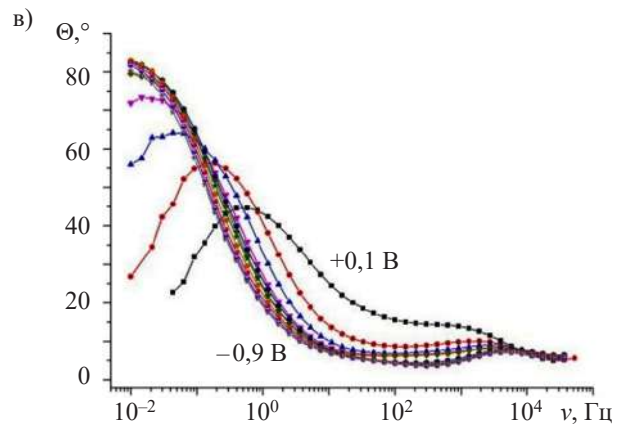


Рис. 6. Діаграми Найквіста (а) та Бодє-діаграми (б) для електродів з CSTR-36 у 0,7М-розчині  $[C_2H_5]_4NBF_4$  в ацетонітрилі, отримані за  $U = U_p \pm 0,5$  В

Параметри електричної еквівалентної схеми для зразка CSTR-36 у 0,7М-розчині  $[C_2H_5]_4NBF_4$  в ацетонітрилі

R1	0,53462 Ом	C2	0,24137 мФ
CPE1-T	0,092823 Ом	R3	2,096 Ом
CPE1-P	0,76811 Ф	C3	0,24014 мФ
R2	0,27024 Ом	R <sub>SC</sub>	0,16756 Ом

Результат дослідження вуглецевого матеріалу CSTR-36 у 0,7М-розчині  $[C_2H_5]_4NBF_4$  в ацетонітрилі за допомогою імпедансної спектроскопії для різних електрохімічних потенціалів представлено на **рис. 5**.

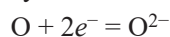
Оскільки значення діелектричної проникності ацетонітрилу суттєво менше ніж у води, в твердому тілі має спостерігатися більше зростання товщини області просторового заряду, й можна припустити, що проблема пов'язана з шунтуванням гельмгольцевої ємності ємністю області просторового заряду карбону. Для моделювання отриманих годографів у цьому випадку використовувалась аналогічна (як для матеріалів з водним електролітом) схема де Леві, модифікована паралельною ланкою  $C_{SC} - R_{SC}$  відповідно до підходу Войта (рис. 5), де вона особливо актуальна з огляду на описані вище процеси.

На **рис. 6** представлено діаграму Найквіста та Боде-діаграми для зразка CSTR-36 в 0,7М-розчині  $[C_2H_5]_4NBF_4$  в ацетонітрилі, отримані за того ж значення потенціалу, що і в дослідженні з водним розчином КОН:  $U = U_p \pm 0,5$  В ( $U_p$  — рівноважний потенціал електрода відносно електрода порівняння). У **таблиці** наведені значення параметрів елементів, що входять до електричної еквівалентної схеми де Леві, що використовувалась для моделювання діаграм Найквіста та Боде.

Аналіз залежності ємності області просторового заряду  $C_{SC}$  зразків, отриманої з електричної еквівалентної схеми, від прикладеного потенціалу в 30%-му водному розчині КОН показує, що при додатній поляризації спостерігається її зменшення, а при прикладанні від'ємної поляризації — збільшення. Такий процес призводить до певного шунтування гельмгольцевої ємності на цьому проміжку електродної поляризації. Наведене у таблиці значення ємності  $C2 = 0,241$  Ф відповідає вуглецевим матеріалам із високорозвиненою мікро- та мезопористою структурою, оскільки згідно з [9] ланка  $CPE1 \parallel R2$  в еквівалентній електричній схемі відповідає за протікання дифузійних процесів в транспортних порах, до яких відносять макро- та мезопори ПВМ, а елемент схеми  $C2 \parallel R3 - C3$  — за вказані процеси в мікропорах. Із даних моделювання годографів імпедансу видно, що  $CPE1-P \approx 0,768$  Ф, що свідчить про ємнісний характер поведінки системи «електрод — електроліт».

Залежність ємності області просторового заряду  $C_{SC}$  від прикладеного потенціалу в 0,7М-розчині  $[C_2H_5]_4NBF_4$  в ацетонітрилі відрізняється за поведінкою та за значеннями. У цьому випадку спостерігається збільшення цієї ємності. З відомої формули для диференційної ємності подвійного електричного шару межі розділу вуглецевого матеріалу з електролітом  $1/C = 1/C_H + 1/C_{SC}$  можемо зробити висновок, що за високих значень ємності області просторового заряду  $C_{SC}$  диференційна ємність визначається значною мірою величиною ємності шару Гельмгольца. Такі результати дозволяють зробити ви-

сновок, що досліджуваний зразок має велику густину станів на рівні Фермі [13]. Незвична залежність ємності області просторового заряду  $C_{SC}$  від прикладеного потенціалу в 30%-му водному розчині КОН пояснюється реакцією адсорбованого кисню з водою на поверхні активованого вуглецевого матеріалу. В цьому випадку атоми кисню забирають з поверхні вуглецевого матеріалу два електрони:



і вступають в реакцію з молекулою води:



відповідним чином зменшуючи на поверхні електрода кількість основних носіїв заряду.

### Висновки

Таким чином, дослідження електрохімічних систем з електролітами різної хімічної природи дозволили встановити вплив області об'ємного заряду в матеріалі електрода на ємнісні характеристики конденсатора. Ємнісний характер процесів на поверхні електрода в частотній області 0,1 — 10 Гц, який був встановлений на основі Боде-кривих, пов'язаний з адсорбцією на поверхні вугілля молекулярного кисню в 30%-му розчині КОН і орієнтаційною адсорбцією полярних молекул ацетонітрилу в 0,7-молярному розчині  $[C_2H_5]_4NBF_4$ . Значення питомої ємності, що становлять 125 Ф/г у КОН та 101 Ф/г у  $[C_2H_5]_4NBF_4$ , визначаються достатнім часом для формування подвійного електричного шару іонами  $K^+$  на поверхні матеріалу електрода та протікання фарадеївських реакцій накопичення ОН-груп на поверхні вуглецю. Саме розмір іона та його гідратної оболонки є основним показником, що впливає на експлуатаційні параметри лабораторних зразків конденсаторного типу.

Отримані результати гальваностатичних досліджень дозволяють рекомендувати отриманий вуглецевий матеріал для виготовлення електродів суперконденсаторів.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Bi Z., Kong Q., Cao Y. et al. Biomass-derived porous carbon materials with different dimensions for supercapacitor electrodes: a review. *J. Mater. Chem. A.*, 2019., vol. 7, iss. 27, p. 16028–16045. <https://doi.org/10.1039/C9TA04436A>
2. Dianat N., Rahmanifar M.S., Noori A. et al. Polyaniline-lignin interpenetrating network for supercapacitive energy storage. *Nano Lett.*, 2021, iss. 21, p. 9485–9493. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02843>
3. Zapata-Benabith Z., Castro C.D., Quintana G. Kraft lignin as a raw material of activated carbon for supercapacitor electrodes. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2022, iss.33, p. 7031–7047. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-07884-9>
4. Wang J., Zhang X., Li Z. et al. Recent progress of biomass-derived carbon materials for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 2020, vol. 451, p. 227794. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227794>
5. Li P., Yang C., Wu C. et al. Bio-based carbon materials for high-performance supercapacitors. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, iss. 17, p. 2931. <https://doi.org/10.3390/nano12172931>

6. Fischer J., Thümmel K., Fischer S. et al. Activated carbon derived from cellulose and cellulose acetate microspheres as electrode materials for symmetric supercapacitors in aqueous electrolytes. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, iss.15, p. 12653–12665. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01449>

7. Будзуляк І.М., Іванічок Н.Я., Рачій Б.І. та ін. Електрохімічні властивості нанопористого вуглецевого матеріалу у  $K^+$ -вмісних водних електролітах. *Фізика і хімія твердого тіла*, 2015, т. 16, № 2, с. 341–346.

8. Ostafiychuk B. K., Budzulyak I. M., Kachmar A. I. et al. Effect of thermochemical modification of activated carbon materials on specific capacity of electrochemical capacitors. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2018, vol. 16, no. 2, p. 303–312.

9. Рачій Б.І., Остафійчук Б.К., Будзуляк І.М. та ін. Вплив термохімічної обробки вуглецевих матеріалів на їх електрохімічні

властивості. *Журнал нано- та електронної фізики*, 2014, т. 6, №4, с. 04031(1) – 04031(6).

10. Стойнов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б., Елкін В.В. *Електрохімічний іміданс*. Москва, Наука, 1991, 336 с.

11. Barsoukov E., Macdonald J.R. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Application*. Canada, Wiley interscience, 2005, 585 p.

12. de Levie R. On porous electrodes in electrolyte solutions: I. Capacitance effects. *Electrochimica Acta*, 1963, vol. 8, iss 10, p. 751–780. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(63\)80042-0](https://doi.org/10.1016/0013-4686(63)80042-0)

13. Mott N.F., Davis E.A. *Electronics Processes in NonCrystallin Materials*. Oxford, Clarendon Press, 1979, 590 p.

Дата надходження рукопису  
до редакції 30.10 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.52  
UDC 538.971

I. V. SEMKIV, V. M. VASHCHYNSKYI, A. I. KASHUBA,  
H. A. ILCHUK, M. V. SOLOVYOV

Ukraine, Lviv Polytechnic National University

E-mail: v.vashchynskyi@gmail.com

## INFLUENCE OF ELECTROLYTE NATURE ON ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF CARBON MATERIAL OF PLANT ORIGIN

*Non-aqueous electrolytes are advantageous for power sources due to the increase in the operating voltage since their electrochemical stability range is much wider. It should be noted that the capacitor's capacitance depends on the capacitance provided by the electrode material, expressed in F/g, while its voltage and resistance depend on the electrolyte. Therefore, it is very important to study the electrochemical properties of carbon material in aqueous and organic electrolytes and to determine the effect of the electrolyte on the capacitance of the capacitor formed on its basis.*

*The cathode mixture was made of porous carbon material obtained from biomass and a binding additive. Then, it was pressed onto a nickel grid with an area of 0,5 cm<sup>2</sup>. A 30% aqueous solution of potassium hydroxide (KOH) and a 0,7-molar solution of tetraethyl ammonium tetrafluoroborate ( $[C_2H_5]_4NBF_4$ ) in acetonitrile ( $CH_3CN$ ) was used as the electrolyte. The measurements were carried out using two- and three-electrode schemes with a silver chloride reference electrode. Modeling impedance data to equivalent electrical circuits has assisted to establish the influence of the volume charge region in the electrode material on the capacitor's capacitive characteristics. The specific capacitance values of 125 F/g in KOH and 101 F/g in  $[C_2H_5]_4NBF_4$  are determined by the electrolyte type used and the nature of salts and bases dissolved in it. The practical significance of the obtained results is the application of the developed methods for obtaining carbon material with developed micro- and mesoporous structures and improved physicochemical properties.*

*Keywords: capacitor systems, porous carbon material, aqueous and organic electrolytes, capacitance.*

### REFERENCES

1. Bi Z., Kong Q., Cao Y. et al. Biomass-derived porous carbon materials with different dimensions for supercapacitor electrodes: a review. *J. Mater. Chem. A.*, 2019., vol. 7, iss. 27, pp. 16028–16045. <https://doi.org/10.1039/C9TA04436A>

2. Dianat N., Rahmanifar M.S., Noori A. et al. Polyaniline-lignin interpenetrating network for supercapacitive energy storage. *Nano Lett*, 2021, iss. 21, pp. 9485–9493. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02843>

3. Zapata-Benabith Z., Castro C.D., Quintana G. Kraft lignin as a raw material of activated carbon for supercapacitor electrodes. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 6 2022, iss.33, pp. 7031–7047. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-07884-9>

4. Wang J., Zhang X., Li Z. et al. Recent progress of biomass-derived carbon materials for supercapacitors. *Journal of Power*

*Sources*, 2020, vol. 451, pp. 227794. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227794>

5. Li P., Yang C., Wu C. et al. Bio-based carbon materials for high-performance supercapacitors. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, iss. 17, pp. 2931. <https://doi.org/10.3390/nano12172931>

6. Fischer J., Thümmel K., Fischer S. et al. Activated carbon derived from cellulose and cellulose acetate microspheres as electrode materials for symmetric supercapacitors in aqueous electrolytes. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, iss.15, pp. 12653–12665. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01449>

7. Budzulyak I.M., Ivanichok N.Ya., Rachiya B.I. et al. Electrochemical Properties of Nanoporous Carbon Material in  $K^+$ -containing Aqueous Electrolytes. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 341–346. (Ukr)

8. Ostafiychuk B. K., Budzulyak I. M., Kachmar A. I. et al. Effect of thermochemical modification of activated carbon materials

on specific capacity of electrochemical capacitors. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 303–312.

9. Rachiy B.I., Ostafiychuk B.K., Budzulyak I.M. et al. The effect of thermochemical treatment of carbon materials on their electrochemical properties. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 04031(1)–04031(6). (Ukr)

10. Stoynov Z.B., Grafov B.M., Savova-Stoynova B., Yolkin V.V. *Elektrokhimicheskiy Impedans* [Electrochemical impedance]. Moscow, Nauka, 1991, 336 p. (Rus)

11. Barsoukov E., Macdonald J.R. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Application*. Canada, Wiley Interscience, 2005, 585 p.

12. de Levie R. On porous electrodes in electrolyte solutions: I. Capacitance effects. *Electrochimica Acta*, 1963, vol. 8, iss 10, pp. 751–780. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(63\)80042-0](https://doi.org/10.1016/0013-4686(63)80042-0)

13. Mott N.F., Davis E.A. *Electronics Processes in NonCrystallin Materials*. Oxford, Clarendon Press, 1979, 590 p.

#### Опис статті для цитування:

Семків І. В., Ващинський В. М., Кашуба А. І., Ільчук Г. А., Соловйов М. В. Вплив природи електроліту на електрохімічні властивості вуглецевого матеріалу рослинного походження. *Технологія и конструирование в электронной аппаратуре*, 2022, № 4–6, с. 52–58. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.52>

#### Cite the article as:

Semkiv I. V., Vashchynskyi V. M., Kashuba A. I., Ilchuk H. A., Solovyov M. V. Influence of electrolyte nature on electrochemical properties of carbon material of plant origin. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 52–58. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.52>

## НОВІ КНИГИ

### НОВІ КНИГИ

**Матвійків М. Д., Васьків Г. М., Вус Б. С., Матвійків С. О. Матеріали для електронних пристроїв.— Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021.**

Викладено основні відомості про матеріали та пов'язані з ними технології, які використовуються в галузі створення електронних пристроїв. Розглянуто властивості матеріалів, а також технології створення та використання матеріалів.

Для студентів закладів вищої освіти, які навчаються за спеціальностями, пов'язаними з використанням матеріалів та технологій. Підручник розрахований на широке коло читачів, які цікавляться сучасними матеріалами, технологіями та пристроями.

