

В.І. Мандзюк, І.Ф. Миронюк, Н.Я. Іванічок, Б.І. Рачій

## **Імпедансна спектроскопія конденсаторних систем, на основі пористих вуглецевих матеріалів, отриманих з сахаридів**

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, 76018 Івано-Франківськ, Україна, (095)305-09-53 [volodymyr.mandzyuk@pnu.edu.ua](mailto:volodymyr.mandzyuk@pnu.edu.ua)*

У роботі з використанням методу імпедансної спектроскопії досліджено електрохімічні процеси в конденсаторних системах на основі пористих вуглецевих матеріалів (ПВМ), отриманих із глюкози, лактози і сахарози за температур активації 800 та 1000°C. Запропоновано еквівалентну електричну схему, яка дозволяє задовільно моделювати імпедансні спектри в діапазоні частот  $10^{-2}$  –  $10^5$  Гц та подано фізичну інтерпретацію кожного елемента електричної схеми. Встановлено, що в конденсаторних системах на основі досліджуваних матеріалів накопичення ємності відбувається за рахунок формування подвійного електричного шару на межі розділу електрод/електроліт, а фарадеївські процеси відсутні. Питома ємність суперконденсаторів на основі отриманих за температури 800°C ПВМ становить 91-154 Ф/г, що зумовлено розвинутою мікропористою структурою матеріалів.

**Ключові слова:** пористий вуглецевий матеріал, імпедансна спектроскопія, суперконденсатор, питома поверхня, еквівалентна електрична схема.

*Подано до редакції 6.10.2021; подано до друку 12.11.2021*

### **Вступ**

Суперконденсатори (СК), які ще називають ультраконденсаторами чи іоністорами, є електрохімічними пристроями великої ємності, значення якої значно перевищує ємність інших типів конденсаторів. Для досягнення ємностей на декілька порядків більших, ніж у звичайних конденсаторах, у СК використовують матеріали електродів з великою площею поверхні та дуже тонкі діелектрики [1-4].

СК можна розділити на три загальні класи: електрохімічні конденсатори на основі подвійного електричного шару (ПЕШ конденсатори), конденсатори із псевдоємнісним накопиченням заряду (псевдоконденсатори) та гібридні конденсатори. Кожен клас характеризується своїм механізмом накопичення заряду: нефарадеївським, фарадеївським та поєднанням першого і другого відповідно. У ПЕШ конденсаторах використовуються вуглецеві матеріали з високою поверхнею, такі як

активоване вугілля [5-7], вуглецеві нанотрубки [8, 9], вуглецеві аерогелі [10, 11]. У псевдоконденсаторах як електроди використовуються оксиди перехідних металів [12, 13] або провідні полімери [14, 15]. У гібридних конденсаторах електроди є асиметричними – один накопичує електростатичну ємність, а інший електрохімічну [16, 17]. Використовуючи для зберігання заряду як фарадеївські, так і нефарадеївські процеси, гібридні конденсатори досягли густини енергії та потужності більшої, ніж ПЕШ конденсатори, без втрат у стабільності циклювання та доступності, що обмежило успіх псевдоконденсаторів.

Поряд з цим мають місце випадки, коли накопичення електричного заряду на поверхні електродного матеріалу відбувається завдяки фарадеївським і нефарадеївським процесам. Це досягається процесами легування електродного матеріалу, насамперед пористого вуглецю, гетероатомами N-, B-, O-, P-, S-, за рахунок чого на

поверхні матеріалу формуються гідрофільні функціональні групи, які покращують змочуваність електроду і, як наслідок, підвищення характеристик конденсатора [18-21].

Тому розуміння електрохімічних процесів, які відбуваються у конденсаторних системах, сформованих на основі пористих вуглецевих матеріалів (ПВМ), мають виняткове значення. Так, у роботі [22], досліджуючи структурно-морфологічні та електрохімічні властивості пористих вуглецевих матеріалів, отриманих карбонізацією сахаридів, методами хронопотенціометрії та циклічної вольтамперометрії нами було показано, що електрична ємність СК забезпечується формуванням ПЕШ на межі розділу електрод/електроліт, а накопичення ємності за рахунок редокс-реакцій (фарадеевських процесів) чи псевдоємності відсутнє. Додаткову інформацію про перебіг електрохімічних процесів в конденсаторних системах можна отримати з використанням методу імпедансної спектроскопії, який дасть можливість детальніше встановити взаємозв'язок між пористою структурою електродного вуглецевого матеріалу та його поведінкою у водному розчині електроліту, що і є метою даної роботи.

## I. Матеріали та методи дослідження

Кристалічні моногідрати глюкози (Г), лактози (Л) та безводної сахарози (С) використовували як прекурсори для вуглеців, отриманих за температури 400°C впродовж 30 хв на повітрі. Окислювальну активацію вуглеців проводили в керамічних тиглях при 800 і 1000°C впродовж 30 хв. Відповідно до цього досліджувані зразки позначалися як Г800, Л800, С800 та Г1000, Л1000, С1000.

Електроди симетричного СК пластинчастої форми були приготовлені із суміші ПВМ: СД = 75:25, де СД – струмопровідна добавка (графіт KS-15 (Lonza Group, Базель, Швейцарія)). Симетричні електроди просочувалися електролітом, розділялися сепаратором і герметизувалися в двоелектродній комірці типорозміру “2525”. Як електроліт використовували 30% розчин КОН.

Імпедансний аналіз СК проводили за допомогою приладу Metrohm Autolab FRA-2 (аналізатор частотних характеристик) в діапазоні частот  $10^{-2}$  –  $10^5$  Гц, амплітуді напруги 10 мВ та потенціалі зміщення від 0 В до 1 В з кроком 0,2 В.

Параметри пористої структури дослідних зразків (дегазованих при 180°C впродовж 24 год) визначалися за допомогою ізотерм адсорбції-десорбції азоту, записаних при 77,4 К з використанням адсорбційного аналізатора Quantachrome Autosorb Nova 2200e. Питома площа поверхні ( $S_{\text{ВЕТ}}$ ,  $\text{м}^2/\text{г}$ ) визначалася за допомогою багатоточкового ВЕТ-методу в обмеженому діапазоні відносного тиску  $P/P_0 = 0,050 \dots 0,035$ . Загальний об'єм пор ( $V$ ,  $\text{см}^3/\text{г}$ ) обчислювали за кількістю адсорбованого азоту при  $P/P_0 \sim 1,0$ . Об'єм мікропор ( $V_{\text{micro}}$ ,  $\text{см}^3/\text{г}$ ), значення питомої поверхні мікро- ( $S_{\text{micro}}$ ,  $\text{м}^2/\text{г}$ ) та мезопор ( $S_{\text{meso}}$ ,  $\text{м}^2/\text{г}$ ) розраховувалися t-

методом [23].

## II. Результати та обговорення

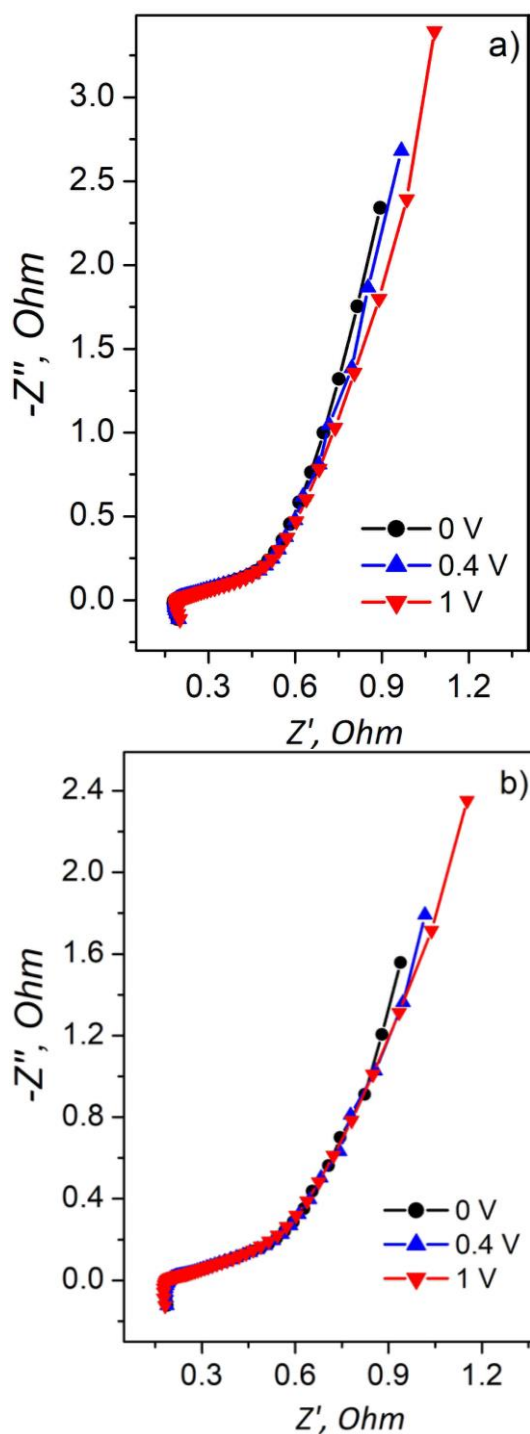
Для вивчення електрохімічних процесів, які відбуваються як на межі розділу електрод / електроліт, так і в об'ємі електродного матеріалу досить ефективним є використання методу імпедансної спектроскопії, оскільки він дає можливість проводити дослідження в досить широкому інтервалі частот ( $f = 10^6$ - $10^{-3}$  Гц) [24].

В основі структурного моделювання передбачуваних процесів на базі отриманих методом імпедансної спектроскопії експериментальних даних лежить системний підхід. Його суть полягає в тому, що досліджуваний об'єкт розглядається як еквівалентна електрична схема (ЕЕС), яка включає елементи, що характеризують фазову межу розділу електрод / електроліт та об'ємний електродний матеріал. ЕЕС є спрощеною моделлю реальних процесів у досліджуваній системі, які створюють опір електричному струму. Базовим критерієм при виборі ЕЕС є цілісний фізичний зміст всіх її структурних елементів за умови оптимальної апроксимації експериментальних годографів імпедансу  $-\text{Im } Z = f(\text{Re } Z)$ .

Як видно з спектрів імпедансу (рис. 1), отриманих для суперконденсатора на основі матеріалів С800 та С1000, за високих частот переважає індуктивна складова. При зменшенні частоти спостерігається домінування ємнісної складової над індуктивною. У середньочастотному діапазоні діаграма Найквіста має вигляд прямої лінії, нахиленої під кутом близько 45°, що вказує на перебіг дифузійних процесів в досліджуваній системі. За низьких частот ця пряма змінює свій нахил до майже вертикального, що свідчить про ємнісне накопичення електричного заряду.

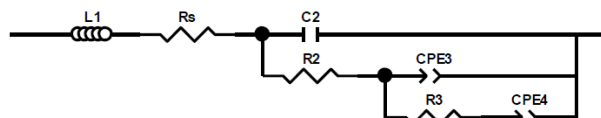
Виходячи із якісного аналізу імпедансних спектрів, нами була підібрана ЕЕС (рис. 2), яка задовільно описує перебіг електрохімічних процесів в СК на основі досліджуваних матеріалів. У даній схемі елемент  $L_1$  відображає індуктивну поведінку електрохімічної системи, яка обумовлена як металевими частинами корпусу, так і розвиненою пористою структурою вуглецевого матеріалу, яка за високих частот є аналогом індуктивності [25]. Елемент  $R_s$  включає в себе опір електроліту, контактів та підвідних проводів. Наступні елементи схеми відповідають за дифузійні процеси в порах вуглецевого матеріалу та накопичення електричних зарядів на межі розділу електрод/електроліт. Зокрема,  $C_2 || R_2$ -ланка відповідальна насамперед за дифузійні процеси в транспортних порах (макро- і мезопорах), а  $CPE_3 || R_3$ - $CPE_4$ -ланка за накопичення заряду в мікропорах. При моделюванні годографів імпедансу був використаний елемент постійної фази  $CPE$ , імпеданс якого визначається згідно рівняння [24]:

$$Z_{CPE} = CPE_T (j\omega)^{-CPE_p} \quad (1)$$



**Рис.1.** Діаграми Найквіста для конденсаторних систем на основі матеріалів S800 (а) і S1000 (б) за різних напруг зміщення.

Параметр  $CPE_p$  враховує фазове відхилення та, відповідно, тип процесу, що моделюється. Зокрема, при значенні  $CPE_p$ , близькому до 1, даний елемент характеризує ємнісну поведінку системи, при  $CPE_p \sim 0,5$  – дифузійну, при  $CPE_p \approx -1$  – індуктивну. Введення даного елемента насамперед обумовлене фрактальною будовою ПВМ [22] і, як наслідок, неоднорідним розподілом носіїв заряду на межі розділу електрод/електроліт.



**Рис. 2.** Еквівалентна електрична схема конденсаторних систем.

Із рис. 1 також слідує, що при збільшенні напруги зміщення найпомітніші зміни у формі діаграми Найквіста спостерігаються у низькочастотній ділянці. Це зумовлено тим, що при зростанні напруги між електродами більша кількість іонів калію приймає участь у формуванні подвійного електричного шару на межі розділу ПВМ/електроліт, внаслідок чого зростає ємність конденсатора.

Аналогічна зміна форми імпедансних кривих при зміні прикладеної напруги є характерною для СК, сформованих на основі глюкози і лактози. Відмінність спостерігається тільки у значеннях дійсної та уявної складових опору.

Слід зауважити, що на діаграмах Найквіста у високочастотній ділянці спектру практично відсутнє чітко виражене деформоване півколо, яке вказує на процеси перенесення і накопичення заряду за участю фарадеївських процесів чи псевдоємності. Даний факт свідчить про домінування ємності ПЕШ над ємністю за рахунок редокс-реакцій, що підтверджує результати гальваностатичного та потенціодинамічного циклювань [22].

Використання ЕЕС дало можливість досить добре наблизити експериментальний спектр до розрахункового (відмінність експериментальних і модельних кривих не перевищує 5 %) та отримати значення параметрів, що входять в схему (табл. 1).

Оскільки перебіг електрохімічних процесів в суперконденсаторах значною мірою залежить від параметрів пористої структури електродного матеріалу (питомої поверхні, загального об'єму пор та співвідношення між мікро- і мезопорами), тому слід з'ясувати її зміни при зростанні температури карбонізації.

Як слідує з результатів низькотемпературної порометрії (табл. 2) у ПВМ, отриманих із лактози і сахарози за температури 800°C, переважають мікропори, питома поверхня яких становить відповідно 73 і 57 %, а об'єм мікропор – 70 і 49 %. Для ПВМ на основі глюкози дані величини становлять відповідно 47 і 43 %, що вказує на незначне домінування мезопор. При підвищенні температури активації до 1000°C найбільш помітні зміни у пористій структурі спостерігаються для ПВМ на основі глюкози і лактози. Зокрема, для зразка Г1000 питома поверхня та загальний об'єм пор зменшуються відповідно у 8 і 12 разів; зменшується також більш ніж у 2 рази частка мікропор. Для матеріалу Л1000 структурні зміни є протилежними: питома поверхня зростає на 50 %, а співвідношення між мікро- і мезопорами майже не змінюється. Для зразка С1000 питома поверхня не міняється, відбувається незначний перерозподіл між мікро- і мезопористою структурою в сторону незначного збільшення частки мікропор.

**Таблиця 1**

Параметри ЕЕС для суперконденсаторів на основі дослідних зразків (напруга зміщення 1 В)

Зразок	L <sub>1</sub> , μH	R <sub>s</sub> , Ohm	C <sub>2</sub> , mF	R <sub>2</sub> , mOhm	CPE <sub>3T</sub> , Ohm	CPE <sub>3P</sub>	R <sub>3</sub> , Ohm	CPE <sub>4T</sub> , F	CPE <sub>4P</sub>
Г800	0.38	0.18	8.4	43	1.53	0.55	0.89	1.26	0.88
Г1000	0.08	0.17	1.7	25	0.78	0.49	0.77	0.33	0.95
Л800	0.46	0.15	6.4	16	1.15	0.56	0.64	1.65	0.92
Л1000	0.62	0.16	9.6	21	1.24	0.61	0.57	1.06	0.89
С800	0.34	0.16	9.2	18	0.98	0.54	0.71	1.17	0.91
С1000	0.35	0.17	7.8	20	0.84	0.53	0.66	0.98	0.90

**Таблиця 2**

Параметри пористої структури дослідних зразків згідно методу низькотемпературної порометрії

Зразок	S <sub>ВЕТ</sub> , m <sup>2</sup> /g	S <sub>micro</sub> , m <sup>2</sup> /g	S <sub>meso</sub> , m <sup>2</sup> /g	V, cm <sup>3</sup> /g	V <sub>micro</sub> , cm <sup>3</sup> /g	V <sub>meso</sub> , cm <sup>3</sup> /g
Г800	383	181	202	0.201	0.086	0.113
Г1000	46	10	36	0.016	0.003	0.013
Л800	437	318	119	0.232	0.162	0.070
Л1000	652	497	155	0.345	0.226	0.118
С800	356	204	152	0.187	0.092	0.095
С1000	362	225	137	0.198	0.115	0.083

Співставляючи дані табл.1 і 2, можна побачити певну кореляцію між значеннями елементів ЕЕС і параметрами пористої структури матеріалів. Для матеріалів із більш розвинутою пористою структурою характерним є вище значення параметра L<sub>1</sub>. Опір R<sub>s</sub> для всіх матеріалів є незмінним (0,15 ÷ 0,18 Ом), оскільки визначається концентрацією електроліту та опором підвідних проводів і контактів, які є постійними. Для параметрів C<sub>2</sub> та R<sub>2</sub>, які характеризують процеси дифузії та накопичення електричного заряду в мезопорах, характерною є пропорційна залежність. Очевидно, що чим розвиненішою є система мезопор, тим більше йонів K<sup>+</sup> буде приймати участь у формуванні ПЕШ на поверхні мезопор. З іншої сторони, утруднюється транспорт йонів до мікропор, що позначається на зростанні опору R<sub>2</sub>. Елемент CPE<sub>3</sub> є елементом постійної фази дифузійного типу (значення CPE<sub>3P</sub> є близьким до 0,5), величина якого також залежить від кількості мікро- і мезопор та їх співвідношення. Характерним є відхилення показника степеня CPE<sub>3P</sub> в рівнянні (1) від ідеального значення 0,5, що пов'язується із фрактальною будовою частинок ПВМ [22]. Ця ж причина зумовлює відхилення параметра CPE<sub>4P</sub> емнісного типу від 1, який характеризує накопичення заряду в мікропорах. Значення параметра R<sub>3</sub> визначається комплексною дією дифузійного опору руху йонів K<sup>+</sup> в мікропорах та омичним опором частинок ПВМ [25].

Із даних табл. 1, маючи значення емності C<sub>2</sub>, яка накопичується в мезопорах, і величину Z<sub>CPE-4</sub> емнісного типу, яка характеризує накопичення електричного заряду в мікропорах, можна оцінити емність ПВМ, приведену до одиниці маси, або так звану питому емність матеріалу (табл. 3). За даними імпедансної спектроскопії найбільшою питомою емністю (154 Ф/г) володіє електродний матеріал на основі пористого вуглецю, отриманого із лактози за температури активації 800°C. Такий результат можна пов'язати із максимальним значенням питомої

поверхні мікропор 318 м<sup>2</sup>/г, на протипагу значенням 181 м<sup>2</sup>/г (для зразка Г800) і 204 м<sup>2</sup>/г (для зразка С800). Характерним є те, що при зростанні температури активації до 1000°C питома емність матеріалів зменшується, причому найбільш помітні зміни у величині питомої емності спостерігаються для СК на основі зразків Л1000 та Г1000. Враховуючи те, що для зразка Л1000 питома поверхня внаслідок активації зростає на 50 % і вся поверхня є відкритою до молекул азоту, слід було б очікувати і збільшення питомої емності. Проте, СК на основі даного матеріалу демонструє 43 % зменшення емності. Ймовірно, така поведінка пов'язана з тим, що не вся поверхня змочується електролітом і не приймає участі у формуванні ПЕШ внаслідок часткової графітизації матеріалу. Для ЕК на основі зразка Г1000 71 % спад питомої емності можна пояснити значним зменшенням питомої поверхні та загального об'єму пор матеріалу (табл. 2). Найменш помітні зміни у величині питомої емності (зменшення на 18 %), спостерігаються для СК на основі ПВМ, отриманих із сахарози.

**Таблиця 3**

Питома емність ПВМ, Ф/г

Зразок	Метод		
	Хроно- потенціо- метрія	Циклічна вольтамперо- метрія	Хроно- Потенціо- метрія
Г800	117	Г800	117
Г1000	36	Г1000	36
Л800	160	Л800	160
Л1000	91	Л1000	91
С800	94	С800	94
С1000	77	С1000	77

Розраховані методом імпедансної спектроскопії значення питомої емності співпадають із результатами хронопотенціометрії [22] та

циклічної вольтамперометрії (питома ємність  $C$  матеріалів розраховувалася згідно рівняння

$$C = \frac{\int_{U_1}^{U_2} I(U) dU}{2ms(U_2 - U_1)},$$

де  $U_1$  та  $U_2$  – граничні потенціали на циклічній вольтамперограмі [22],  $I(U)$  – миттєвий струм,  $m$  – маса зразка,  $s$  – швидкість сканування) (табл. 3).

## Висновки

За даними імпедансної спектроскопії електрохімічні процеси в конденсаторних системах на основі ПВМ, отриманих із сахаридів, пов'язані із дифузією іонів калію в транспортних порах (макро- і мезопорах) та їх накопиченням на межі розділу ПВМ/електроліт в мікропорах. Накопичення ємності за рахунок редокс-реакцій (фарадеевських процесів) чи псевдоємності відсутнє, що підтверджує результати хронопотенціометрії та циклічної вольтамперометрії.

Встановлено взаємозв'язок між значеннями елементів ЕЕС і параметрами пористої структури

матеріалів та проаналізовано їх зміну при зростанні температури активації ПВМ.

Значення питомої ємності суперконденсаторів становлять 154 Ф/г (Л800), 112 Ф/г (Г800) та 91 Ф/г (С800), що задовільно корелює із величиною питомої поверхні та загальним об'ємом пор даних зразків. При зростанні температури активації до 1000°C відбувається зменшення питомої ємності СК на 43, 71 і 18 % відповідно.

**Мандзюк В.І.** – доктор фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

**Миронюк І.Ф.** – доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедрою хімії;

**Іванічок Н.Я.** – кандидат фізико-математичних наук, провідний фахівець спільної навчально-наукової лабораторії фізики магнітних плівок Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України та ДВНЗ “Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника” МОН України;

**Рачій Б.І.** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри матеріалознавства і новітніх технологій.

- [1] B.E. Conway, *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*. (Kluwer-Plenum, New York, 1999).
- [2] R. Kotz, M. Carlen, *Electrochim. Acta* 45(15-16), 2483 (2000) [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(00\)00354-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00354-6).
- [3] A. Burke, *J. Power Sources* 91(1), 37 (2000) [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00485-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00485-7).
- [4] J.R. Miller, A.F. Burke, *Electrochem. Soc. Interface* 17(1), 53 (2008) <https://doi.org/10.1149/2.f08081if>.
- [5] B.K. Ostafychuk, I.M. Budzulyak, B.I. Rachiy, R.P. Lisovsky, V.I. Mandzyuk, P.I. Kolkovsky, R.I. Merena, M.V. Berkeshchuk, L.V. Golovko, *J. Nano- Electron. Phys.* 9(5), 05001-1 (2017) [doi: 10.21272/jnep.9\(5\).05001](https://doi.org/10.21272/jnep.9(5).05001).
- [6] J.Y. Hwang, M. Li, M.F. El-Kady, R.B. Kaner, *Adv. Funct. Mater.* 27, 1605745 (2017) <https://doi.org/10.1002/adfm.201605745>.
- [7] K. Dujearic-Stephane, M. Gupta, A. Kumar, V. Sharma, S. Pandit, P. Bocchetta, Y. Kumar, *J. Compos. Sci.* 5, 66 (2021) (<https://doi.org/10.3390/jcs5030066>).
- [8] H. Pan, J. Li, Y.P. Feng, *Nanoscale Res. Lett.* 5, 654 (2010) (<https://doi.org/10.1007/s11671-009-9508-2>).
- [9] C. Zheng, W. Qian, C. Cui, G. Xu, M. Zhao, G. Tian, F. Wei, *J. Nat. Gas Chem.* 21(3), 233 (2012) [https://doi.org/10.1016/S1003-9953\(11\)60358-7](https://doi.org/10.1016/S1003-9953(11)60358-7).
- [10] A. Halama, B. Szubzda, G. Pasciak, *Electrochim. Acta* 55, 7501 (2010) <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2010.03.040>.
- [11] J. Xu, X. Zhou, M. Chen, S. Shi, Y. Cao, *Micropor. Mesopor. Mat.* 265, 258 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.024>.
- [12] B.J. Lee, S.R. Sivakkumar, J.M. Ko, J.H. Kim, S.M. Jo, D.Y. Kim, *J. Power Sources* 168(2), 546 (2007) <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.02.076>.
- [13] W. Wei, X. Cui, W. Chen, D.G. Ivey, *Chem. Soc. Rev.* 40(3), 1697 (2011) <https://doi.org/10.1039/C0CS00127A>.
- [14] Y. Xu, J. Wang, W. Sun, S. Wang, *J. Power Sources* 159(1), 370 (2006) <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.011>.
- [15] V. Gupta, N. Miura, *Mater. Lett.* 60(12), 1466 (2006) <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.11.047>.
- [16] H. Inoue, T. Morimoto, S. Nohara, *Electrochem. Solid-State Lett.* 10(12), A261 (2007) <https://doi.org/10.1149/1.2781524>.
- [17] P.F. Ortega, Garbas A. dos Santos Junior, L.A. Montoro, G. Silva, C. Blanco, R. Santamaría, R.L. Lavall, *J. Phys. Chem. C*, 122(3), 1456 (2018) <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b09869>.
- [18] V.V. Strelko, V.S. Kuts, P.A. Thrower, *Carbon* 38(10), 1499 (2000) [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00121-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00121-4).

- [19] M. Seredych, D. Hulicova-Jurcakova, G.Q. Lu, T.J. Bandoz, Carbon 46(11), 1475 (2008) <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.06.027>.
- [20] B.K. Ostafiychuk, I.M. Budzulyak, M.M. Kuzyshyn, B.I. Rachiy, R.A. Zatorskiy, R.P. Lisovskiy, V.I. Mandzyuk, J. Nano- Electron. Phys. 5(3), 03049-1 (2013).
- [21] G. Hasegawa, T. Deguchi, K. Kanamori, Y. Kobayashi, H. Kageyama, T. Abe, K. Nakanishi, Chem. Mater. 27(13), 4703 (2015) <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b01349>.
- [22] V.I. Mandzyuk, I.F. Myronyuk, V.M. Sachko, B.I. Rachiy, Yu.O. Kulyk, I.M. Mykytyn, J. Nano- Electron. Phys. 10(2), 032018-1 (2018) [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(2\).02018](https://doi.org/10.21272/jnep.10(2).02018).
- [23] S.J. Gregg, K.S.W. Sing, Adsorption, surface area and porosity (Academic Press, London, 1982).
- [24] E. Barsoukov, J.R. Macdonald, Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications (John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2018).
- [25] I.F. Myronyuk, V.I. Mandzyuk, V.M. Sachko, V.M. Gun'ko, Nanoscale Res. Lett. 11(508), 1 (2016) <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1723-z>.

V.I. Mandzyuk, I.F. Mironyuk, N.Ya. Ivanichok, B.I. Rachiy

## Impedance spectroscopy of capacitor systems based on saccharide-derived porous carbon materials

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine,  
[volodymyr.mandzyuk@pnu.edu.ua](mailto:volodymyr.mandzyuk@pnu.edu.ua)*

The electrochemical processes in capacitor systems based on porous carbon materials (PCMs) derived from glucose, lactose, and saccharose at activation temperature of 800 and 1000°C are explored using impedance spectroscopy method. An equivalent electric circuit, which allows modeling of the impedance spectra in the frequency range from  $10^{-2}$  to  $10^5$  Hz, is proposed, and a physical interpretation of each element of the electrical circuit is presented. It is set that in capacitor systems on the basis of the explored materials the accumulation of capacitance occurs due to the formation of a double electric layer at the electrode/electrolyte boundary, and Faradaic processes are minimized. The specific capacity of supercapacitors based on PCMs obtained at 800°C is 91-154 F/g due to the developed microporous structure of materials.

**Keywords:** porous carbon material, impedance spectroscopy, supercapacitor, specific surface area, equivalent electric circuit.