

**Голові спеціалізованої вченої ради  
ДФ 20.051.097  
Прикарпатського національного  
університету  
імені Василя Стефаника  
доктору фізико-математичних наук,  
професору Роману ІЛЬНИЦЬКОМУ  
(76018, м. Івано-Франківськ,  
вул. Шевченка, 57)**

### **РЕЦЕНЗІЯ**

доктора фізико-математичних наук, професора,  
професора кафедри фізики і методики викладання  
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника

**Яблонь Любові Степанівни**

на дисертаційну роботу **Іванічка Олега Миколайовича**  
**«Механізми накопичення заряду асиметричними системами на основі  
вуглецевого матеріалу різної морфології і структури»**, подану на здобуття  
ступеня доктора філософії в галузі знань 10 Природничі науки  
за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали

#### **Актуальність теми.**

Електрохімічні джерела енергії, зокрема батареї та суперконденсатори привертають значну увагу науковців і практиків через стрімке зростання попиту на енергію від зелених відновлюваних технологій. Батареї та паливні елементи мають високу ємність накопичення енергії, але відносно низьку питому потужність. Навпаки, електрохімічні конденсатори мають вищу густину потужності та довший термін служби, демонструючи високу кулонівську ефективність, більшу густину струму та швидку реакцію на запуск, хоча вони мають нижчу густину енергії.

Однією з можливостей збільшення густину енергії суперконденсатора є використання асиметричних конфігурацій, в яких комбінуються електроди на основі пористих вуглецевих матеріалів з різними морфологією, структурою та масою. Такі технологічні підходи як поєднання вуглецевих електродів різної маси чи використання матеріалів з різними структурно-морфологічними характеристиками дозволяють досягти більшої ємності та густини енергії, порівняно з симетричними суперконденсаторами. Встановлення механізмів кінетики електродних процесів в асиметричних системах на основі пористого вуглецевого матеріалу та з'ясування впливу структурно-морфологічних і

питомих електропровідних характеристик вказаних матеріалів на питомі енергоємнісні характеристики асиметричних електрохімічних конденсаторів і обумовило актуальність дисертаційного дослідження Іванічка О. М.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Запропоновано режими отримання пористого вуглецевого матеріалу. Показано, що в залежності від температури та тривалості активації вуглецеві матеріали володіють різною морфологією та розподілом пор за розмірами. Вперше встановлено залежність середнього розміру графітових фрагментів від температури. Показано, що термічна активація сприяє розвитку його мезопористої структури з відносним вмістом мезопор близько 75-78 % та дозволяє збільшити питому поверхню вихідного матеріалу приблизно в 2 рази. З'ясовано, що збільшення температури карбонізації біомаси призводить до зменшення питомого опору отриманого вуглецевого матеріалу більше ніж на 8 порядків. Встановлено, що змінюючи температуру термохімічної активації ортофосфорною кислотою вихідної сировини (біомаси), отримано мезопористі вуглецеві матеріали з питомою поверхнею 734 - 1385 м<sup>2</sup>/г, які володіють питомими ємнісними характеристиками 122 - 140 Ф/г при струмах розряду 5 - 100 мА. Запропоновано методики синтезу та модифікації матеріалів, які можуть використовуватися як електродні матеріали в пристроях накопичення та збереження електричної енергії. Сформовано асиметричні суперконденсатори та показано перспективність використання отриманих вуглецевих матеріалів для даних пристроїв.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Запропоновано методи отримання пористих вуглецевих матеріалів, які можуть застосовуватися для формування електродів електрохімічних конденсаторів симетричного і асиметричного типу. Отримані результати можуть бути використані у подальшій науково дослідницькій роботі, а також як навчальний матеріал для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти.

Основний зміст дисертації висвітлено в 4 наукових статтях у фахових журналах, які індексуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science, а також апробовано на 9 міжнародних і всеукраїнських конференціях. Обсяг друкованих праць та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікацій основного змісту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали. Наведені публікації відображають основний зміст дисертації і отримані автором наукові результати.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

У першому розділі автор проводить критичний аналіз наукової літератури, яка стосується сучасного стану досліджень в енергетичній сфері та в галузі відновлюваних джерел енергії. Особлива увага приділена перевагам та недолікам різних пристроїв накопичення енергії, а також їх класифікації за механізмами зберігання заряду. Крім того, розглядається концепція асиметричних суперконденсаторів на основі вуглецевих електродів та перспективи застосування водних електролітів у цих системах. Підкреслено важливість пористих вуглецевих матеріалів як активної складової електродів суперконденсаторів симетричного і асиметричного типів, розглянуто їх особливості для ефективного зберігання електричного заряду.

У другому розділі дисертації описуються способи отримання пористих вуглецевих матеріалів з різними структурними та морфологічними характеристиками, а також методи дослідження їх структури, стану поверхні та електрохімічної поведінки. Описані основи функціонування та загальні характеристики лабораторного обладнання для методів адсорбційної порометрії, скануючої електронної мікроскопії, X-променевої дифрактометрії, спектроскопія комбінаційного розсіювання світла, X-променевої флуоресцентної спектроскопії, ІЧ-спектроскопії, імпедансної спектроскопії, циклічної вольтамперометрії та гальваностатичного заряду/розряду.

У третьому розділі дисертації описані методики отримання пористих вуглецевих матеріалів з рослинної біомаси (шкарлупи волоських горіхів) шляхом карбонізації, термохімічної активації ортофосфорною кислотою. Зокрема, особливості пористої структури вуглецевих матеріалів досліджувалися методом низькотемпературної порометрії. З'ясовано, що температура карбонізації 800 °С вихідної сировини дає можливість отримати пористі вуглецеві матеріали з питомою поверхнею 237 м<sup>2</sup>/г, а подальша термічна активація при 400 °С впродовж 2 год дозволяє збільшити значення питомої поверхні до 431 м<sup>2</sup>/г. Термохімічна активація ортофосфорною кислотою вихідної сировини є ефективним методом для отримання мезо-пористих вуглецевих матеріалів з питомою площею поверхні 734 - 1385 м<sup>2</sup>/г, що є важливою передумовою для їх використання як електродів в асиметричних суперконденсаторах.

Четвертий розділ присвячений дослідженню питомих електропровідних та енергоємнісних характеристик отриманих вуглецевих матеріалів як електродів симетричних і асиметричних суперконденсаторів, використовуючи методи імпедансної спектроскопії, циклічної вольтамперометрії та гальваностатичного заряду/розряду.

З огляду на отримані дані, проаналізовано механізми накопичення електричного заряду в електрохімічних системах з використанням

досліджуваних матеріалів. Також підібрано еквівалентні електричні схеми, які адекватно описують перебіг електрохімічних процесів в електродних матеріалах. Співставлено дані структурно-морфологічних параметрів, електропровідних та електрохімічних досліджень отриманих пористих вуглецевих матеріалів та визначені оптимальні режими отримання, при яких симетричні та асиметричні суперконденсатори володіють максимальним значенням питомої ємності. Показано, що запропонована в дисертаційній роботі концепція асиметричного конденсатора дозволяє збільшити питомі ємнісні характеристики на 15 %.

#### **Відсутність порушення академічної доброчесності.**

За результатами перевірки дисертаційної роботи та публікацій не виявлено ознак академічного плагіату, елементів фальсифікації. Автор використовує посилання на свої наукові публікації, публікації інших авторів та джерел.

#### **Зауваження до змісту тексту дисертації:**

1. У роботі не обґрунтовано, чому в якості вихідної сировини було обрано саме шкарлупу волоських горіхів?
2. На сторінці 82 сказано, що збільшення температури карбонізації призводить до зменшення об'єму мікропор і це може бути пов'язано з вигоранням вуглецевого матеріалу, що супроводжується розширенням наявних мікропор. Що автор має на увазі під «розширенням мікропор»?
3. Для практичного використання результатів досліджень бажано було б у роботі подати скільки становив вихід продукту для пористих вуглецевих матеріалів в залежності від режимів отримання.
4. У роботі зустрічаються деякі неточності щодо використаної термінології. Наприклад, окислювально-відновні реакції (стор. 36), але окисно-відновний пік (стор. 67), йони і катіони (стор. 26).
5. У роботі допущені орфографічні помилки, наприклад у слові «посиланнь» (стор. 20), «зазбезпечують» (стор. 28), «ймовірнро» (стор. 123).

Проте, наведені вище зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Дані зауваження є дискусійними і не стосуються висновків та наукових положень, які формують наукову новизну отриманих результатів та не применшують наукову і практичну цінність роботи. У роботі отримано нові та достовірні дані, які мають важливе значення для розробки більш ефективних та стабільних матеріалів, що можуть бути використані у пристроях для накопичення та збереження електричної енергії.

Вважаю, що дисертаційна робота за актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, науковою і практичною цінністю отриманих результатів і висновків, формою викладу є оригінальним авторським дослідженням, яке повністю задовольняє усім вимогам МОН України: «Порядку присудження

ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 та наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), які пред'являються до дисертацій, а її автор Іванічок О.М., заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

**Рецензент:**

доктор фізико-математичних наук,  
професор, професор кафедри  
фізики і методики викладання  
Прикарпатського національного  
університету імені Василя Стефаника

Любов ЯБЛОНЬ

