

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

### **РЕЦЕНЗІЯ**

доктора фізико-математичних наук, професора,  
професора кафедри матеріалознавства і новітніх технологій  
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника

**Яремія Івана Петровича**

на дисертацію **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.**

Одним із найперспективніших видів накопичувачів електричної енергії на сьогодні залишаються електрохімічні конденсатори (суперконденсатори), що зумовлено їх високою питомою потужністю, тривалим терміном експлуатації, легкістю інтеграції в об'єкти техніки та простотою використання. Проте, поряд із високою питомою потужністю суперконденсатори мають нижчі, в порівнянні з батареями, значення питомої енергії. Підвищення експлуатаційних характеристик хімічних джерел електричної енергії на сьогодні є надзвичайно важливим і актуальним науково-технічним завданням. Його вирішення різко прискорить витіснення екологічно «грязних» двигунів внутрішнього згорання, а

також забезпечить відчутний прогрес у розвитку енергозберігаючих технологій у різних галузях людської діяльності. Одним із найперспективніших напрямків досліджень у цьому руслі є розробка сучасних асиметричних електрохімічних конденсаторів. Тому дисертація Іванічка О. М., присвячена отриманню і дослідженню пористих вуглецевих матеріалів для електродів асиметричних суперконденсаторів та вивченню механізмів накопичення заряду асиметричними системами на їх основі, є своєчасним, цікавим і актуальним дослідженням.

**Наукова новизна** полягає у тому, що дисертантом оптимізовані режими для отримання пористих вуглецевих матеріалів з різною структурою та морфологією. Вперше встановлено залежність середнього розміру графітових фрагментів від температури карбонізації і показано, що у процесі карбонізації в діапазоні температур 400 - 800°C відбувається зменшення середнього поперечного розміру графітових фрагментів від  $\approx 10$  до  $\approx 8$  нм, а підвищення температури карбонізації призводить до зростання розміру графітових частинок. Показано, що збільшення температури карбонізації сприяє зменшенню питомого опору вуглецевого матеріалу більше як на 8 порядків. Сформовано макети асиметричних електрохімічних конденсаторів та досліджено їх питомі ємнісні характеристики в 33 % водному розчині КОН. Показано, що збільшуючи масу аноду для збалансування заряду, накопиченого на електродах можна покращити питомі ємнісні характеристики електрохімічних конденсаторів на 15 %.

#### **Практична значимість.**

Розроблені методи отримання пористих вуглецевих матеріалів для електродів суперконденсаторів симетричного та асиметричного типів. Результати можуть використовуватися для подальших наукових досліджень та навчання студентів за спеціальностями галузі знань 10 Природничі науки.

#### **Основний зміст.**

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів і висновків. Описано актуальність теми, цілі роботи, методи дослідження, основні результати та їх практичну значимість, а також приведено список використаних

джерел та додаток.

У першому розділі представлено аналіз сучасних досліджень в енергетиці та з відновлюваних джерел енергії, розглянуто переваги та недоліки різних накопичувачів енергії, класифікацію за механізмами накопичення заряду в електрохімічних системах симетричного та асиметричного типів. Описана концепція асиметричних суперконденсаторів з вуглецевими електродами, перспективи водних електролітів для даного застосування та переваги пористих вуглецевих матеріалів для електродів суперконденсаторів.

Другий розділ описує способи отримання пористих вуглецевих матеріалів з різними структурно-морфологічними характеристиками та методи дослідження структури, стану поверхні, електропровідності та електрохімічної поведінки отриманих вуглецевих матеріалів. Стисло описано лабораторне обладнання для досліджень та принципи його роботи.

У третьому розділі описано запропоновані автором методики отримання пористих вуглецевих матеріалів із шкарлупи волоських горіхів трьома шляхами:

- карбонізація вихідної сировини в атмосфері залишкових газів;
- термічна доактивація за температури 400 °С;
- хімічна активація ортофосфорною кислотою.

Представлено результати досліджень впливу режимів отримання на структурно-морфологічні властивості вуглецевих матеріалів.

У четвертому розділі представлені результати дослідження питомих електропровідних характеристик вуглецевих матеріалів методом імпедансної спектроскопії. Використовуючи методи циклічної вольтамперометрії, гальваностатичного заряду / розряду та електрохімічного імпедансу представлені результати електрохімічних досліджень отриманих пористих вуглецевих матеріалів та макетів симетричного і асиметричного суперконденсаторів.

На підставі отриманих результатів електрохімічного імпедансу описано механізми накопичення електричного заряду в досліджених електрохімічних системах та підібрано еквівалентні електричні схеми, які задовільно описують перебіг електрохімічних процесів у вуглецевих матеріалах. Запропонована

фізична інтерпретація елементів еквівалентних електричних схем та показано, що переважаючим механізмом накопичення заряду є заряд/розрядні процеси на подвійному електричному шарі.

**Повнота викладення матеріалів дисертації у роботах, які опубліковані автором.** Основні наукові положення дисертації, висновки та рекомендації Іванічок О.М. достатньо повно представив у 13-ти працях, а саме: 4-х статтях, опублікованих у фахових наукових виданнях, які індексуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science, а також у 9-ти тезах доповідей на Міжнародних науково-практичних конференціях, одна з яких індексуються базою Scopus. 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. Вищевказане дозволяє стверджувати, що представлена на рецензування дисертація є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого у достатній мірі опубліковані та мають значення для розвитку вітчизняної науки.

**Дані про відсутність текстових запозичень та порушення академічної доброчесності.**

Під час детального розгляду дисертації порушень академічної доброчесності та елементів фальсифікації не виявлено. Автор використовує посилання на свої наукові публікації, публікації інших авторів та джерел.

**Зауваження до змісту та оформлення дисертації:**

1. У роботі зразки вуглецевих матеріалів отримували методом термічного впливу в атмосфері залишкових газів в інтервалі температур  $400 \div 1000^\circ\text{C}$ . Проте, термін «атмосфера залишкових газів» варто пояснити детальніше, як і механізми її впливу на вуглецевий матеріал.

2. Для кращого розуміння та порівняння питомих ємнісних характеристик суперконденсаторів варто було представити значення густини розрядного струму.

3. Запис середнього поперечного розміру графітових фрагментів з точністю до сотих нанометра (наприклад, 9,86 нм чи 8,02 нм) є необґрунтованим. Представлена на рис. 3.4 залежність та висновки з неї не

викликають сумніву навіть при похибці в кілька десятих нанометра.

4. У переліку скорочень і умовних позначень частина скорочень наводиться українською мовою, а частина англійською. Дані скорочення потрібно подавати українською мовою або подавати два варіанти (українською та англійською мовами).

Вказані зауваження не несуть принциповий характер і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. В загальному, дослідження є завершеною самостійною науковою роботою, яка виконана на високому науковому рівні та у повному обсязі вирішує поставлені завдання. У ньому отримано нові обґрунтовані та достовірні результати, які є суттєвими при створенні більш ефективних та стійких матеріалів для використання їх у пристроях накопичення і збереження енергії.

Вважаю, що дисертація Іванічка О. М. «Механізми накопичення заряду асиметричними системами на основі вуглецевого матеріалу різної морфології і структури» за актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, науковою і практичною цінністю отриманих результатів і висновків відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії КМУ» від 12.01.2022 № 44 (зі змінами) та Вимогам до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 № 40 (зі змінами), а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Рецензент:

доктор фізико-математичних наук, професор,  
професор кафедри матеріалознавства і новітніх технологій  
Прикарпатського національного  
університету імені Василя Стефаника

Іван ЯРЕМІЙ

