

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Карпатського національного

університету імені Василя Стефаника

доктор економічних наук, професор

Валентина ЯКУБІВ

“24” вересня 2025 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 1 від 22 вересня 2025 р. фахового семінару кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Карпатського національного університету імені Василя Стефаника.

ПРИСУТНІ:

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Коцюбинський В. О.;

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства (за сумісництвом), декан фізико-технічного факультету Гасюк І. М.;

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Будзуляк І. М.;

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Яремій І. П.;

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Бойчук В. М.;

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства (за сумісництвом), завідувач відділу аспірантури і докторантури, гарант освітньо-наукової програми «Прикладна фізика та наноматеріали» третього освітньо-наукового рівня вищої освіти галузі знань 10 Природничі науки спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали Ільницький Р. В.;

доктор фізико-математичних наук, старший дослідник, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Рачій Б.І.;

кандидат фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики та астрономії Никируй Л. І.;

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та астрономії Яблонь Л. С.;

доктор фізико-математичних наук, професор, професор, кафедри фізики та астрономії Салій Я. П.;

З присутніх – 9 докторів наук та 1 кандидат фізико-математичних наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

Головуючий на фаховому семінарі – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Коцюбинський В.О.

СЛУХАЛИ:

1. Інформацію про дисертацію та здобувача

Дисертантка Лісовська Світлана Андріївна, аспірантка 4 року навчання денної (державної) форми навчання за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали. Дисертація на тему «Структура, морфологія та електрохімічні властивості електродних матеріалів систем накопичення заряду», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Тему дисертації «Структура, морфологія та електрохімічні властивості електродних матеріалів систем накопичення заряду» затверджено на засіданні Вченої ради Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника» (протокол №3 від «03» листопада 2020 року). Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор Ільницький Роман Васильович, наказ № 395 від 27.08.2020 р.

2. Виступ здобувачки Лісовської Світлани Андріївни

Актуальність теми. Сучасний розвиток енергетики та електроніки вимагає створення нових систем зберігання енергії, здатних поєднувати високу густину енергії та потужності з тривалим терміном служби і низькою вартістю. Серед таких пристроїв особливе місце посідають електрохімічні конденсатори, які за графіком Ragone займають проміжне положення між традиційними

конденсаторами та акумуляторами, забезпечуючи швидку зарядку/розрядку та високий ресурс циклів. Ключову роль у досягненні їхніх характеристик відіграють електродні матеріали, насамперед вуглецеві. Вуглецеві матеріали вирізняються високою питомою площею поверхні, електропровідністю, хімічною стабільністю та відносною доступністю синтезу з недорогих прекурсорів. Активовані, карбідопохідні, шаблонні вуглеці, нанотрубки, цибулиноподібний вуглець та графен демонструють різні морфологічні та електрохімічні властивості, що відкриває можливість оптимізації роботи ЕК для конкретних застосувань. Дослідження структури й морфології таких матеріалів дозволяє підвищити їх ємність і потужність, а також розробити нове покоління високоефективних систем накопичення заряду.

Таким чином, дослідження структури, морфології та електрохімічних властивостей електродних матеріалів є ключовим завданням сучасної науки про накопичення енергії, оскільки воно забезпечує можливість зміщення кривої Ragone суперконденсаторів у область більш високої енергетичної щільності при збереженні їхніх традиційних переваг — високої питомої потужності, довговічності та безпечності.

Мета дисертаційного дослідження полягає у встановленні взаємозв'язків між структурою, морфологією та методами отримання нанопористих вуглецевих матеріалів і їх електрохімічними властивостями для оптимізації систем накопичення заряду.

У відповідності до поставленої мети сформульовано наступні завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні наукові підходи до створення та застосування електродних матеріалів у системах накопичення заряду.
2. Дослідити морфологічні, структурні та поверхневі характеристики активованих вуглецевих матеріалів різного походження та способу отримання.
3. Встановити залежність адсорбційних властивостей і фрактальної розмірності поверхні вуглецевих матеріалів від умов термічної активації.
4. Визначити вплив варіюванні температури й тривалості активації на мікро- та мезопористу структуру вуглецевих матеріалів.

5. З'ясувати вплив структурних і морфологічних особливостей вуглецевих матеріалів на їхні електрохімічні характеристики (питому ємність, стабільність, провідність).

6. Оцінити вплив струмопровідних добавок та умов відпалу на ємнісні характеристики електродів.

7. Встановити оптимальні умови синтезу та активації нанопористих вуглецевих матеріалів для створення високоефективних електродів суперконденсаторів.

Об'єкт дослідження – процес формування пористої структури вуглецевих електродних матеріалів для систем накопичення зарядів.

Предмет дослідження – вплив методів синтезу та режимів активації на структуру, морфологію та електрохімічні властивості нанопористих вуглецевих матеріалів.

Дослідження здійснювали методами, які представлено на слайді: адсорбційна порометрія, скануюча електронна мікроскопія, комбінаційне розсіювання світла, X-променевий флуоресцентний аналіз, малокутове X-променеве розсіювання, імпедансна спектроскопія, циклічна вольтамперометрія, хронопотенціометрія, методи візуалізації та математичного моделювання експериментальних даних.

Схема отримання нанопористих вуглецевих матеріалів представлена на рис.1. У нашій роботі такі матеріали отримували методом термохімічної активації з відходів харчової промисловості, зокрема шкаралупи горіхів. Отримання нанопористих вуглецевих матеріалів здійснювали методом термохімічної активації. Механічно подрібнену шкаралупу із горіха засипали в автоклав і нагрівали до 300-350 °С, при швидкості нагріву 10 °С/хв, та витримували при даній температурі протягом 30 хв. Отриманий карбоніат механічно подрібнювали до фракції 500 мкм та змішували з водою та калій гідроксидом у ваговому співвідношенні 1:1:0,5. Отриману суміш перемішували протягом 30 хв, після чого поміщали у сушильний шкаф і витримували при температурі 70-80 °С протягом 48 год. Після повного висихання отриманий матеріал засипали у автоклав, поміщали у піч і нагрівали до 900°С при

швидкості нагріву $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, та витримували при даній температурі протягом 30 хв. Охолодження здійснювали у режимі виключеної печі. Після повного охолодження вуглецевий матеріал відмивали від луку дистильованою водою до нейтрального рН. Таким чином отримано термохімічно активований вуглецевий матеріал серії (L). Після чого матеріал піддавали додатковій термічній активації в окиснювальному середовищі. Було отримано три серії зразків (LH, LD, LF), активованих при $400, 450$ та 500°C .

Характеристики пористої структури отриманих вуглецевих матеріалів вивчали аналізуючи ізотерми адсорбції/десорбції азоту отримані за допомогою порозиметра Quantachrome Autosorb Nova 2200e при температурі кипіння азоту. Перед вимірюванням досліджувані вуглецеві зразки дегазувалися при температурі $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вакуумі протягом 18 год.

Дослідження ізотерм адсорбції азоту показали, що отримані зразки мають розвинену пористу структуру з переважанням мезопор площа яких становить $528\text{ м}^2/\text{г}$ та високою питомою площею поверхні понад $700\text{ м}^2/\text{г}$. Дані для параметрів пористої структури вихідного зразка L подані в таблиці 1. Ізотерма отримана для матеріалу серії L (рис.2) характеризується наявністю гістерезису при низькому тиску, що проявляється у розбіжності між гілками адсорбції та десорбції в області низьких відносних тисків.

Для детального аналізу пористої структури ми використали два взаємодоповнюючих методи — ВЛН та DFT.

Методом ВЛН встановлено, що найбільший внесок у площу поверхні та об'єм забезпечують мезопори діаметром $2,5\text{--}3,5\text{ нм}$ (рис.3), тоді як пори понад 10 нм дають лише незначний вклад. Водночас метод ВЛН не враховує дуже вузькі пори, менше 2 нм , тому інформація про мікропори є обмеженою. Для їх оцінки ми застосували метод теорія функціоналу густини (рис. 4). Отримані результати свідчать про переважаючу мікропористу структуру з наявністю мезопор. Максимальні значення питомого об'єму пор ($0,068\text{ см}^3/\text{г}$) та питомої площі поверхні ($175\text{ м}^2/\text{г}$) були виявлені у вузькому діапазоні пор $0,65\text{--}1,25\text{ нм}$, що вказує на значну частку мікропор.

У наступному діапазоні пор ($d > 6$ нм) значення питомого об'єму та площі зменшуються, що свідчить про незначну макропористу складову.

Таким чином досліджений вуглецевий матеріал характеризується широким розподілом пор, у якому переважають мікропори з доповненням мезопор.

На рисунку 5 показано ізотерми адсорбції–десорбції азоту для зразків, активованих при $400\text{ }^\circ\text{C}$. Всі вони належать до ізотерм типу II за класифікацією IUPAC, що характерно для мезопористих матеріалів з наявністю мікропор. З аналізу ізотерм видно, що зі збільшенням тривалості активації від 30 до 150 хв об'єм сорбованого азоту поступово зростає, досягаючи максимального значення близько $540\text{ см}^3/\text{г}$ для зразка LH150. Це вказує на інтенсивний розвиток пористої структури та збільшення питомої поверхні.

Результати показують, що температура та час активації є ключовими параметрами, які дозволяють керувати розвитком мікро- та мезопористої структури. Оптимальний баланс спостерігається при $400\text{ }^\circ\text{C}$ і тривалості 120–150 хв, коли структура характеризується максимальною питомою поверхнею і добре розвиненими мезопорами.

Розрахунки за методом DFT на основі ізотерм адсорбції азоту при 77 K дали змогу визначити розподіл пор у діапазоні 0,5–50 нм та порівняти його з даними ВЛН. (Встановлено, що основний внесок у площу поверхні та об'єм пор забезпечують діапазони 0,65–1,25 нм і 2,5–5 нм, що підтверджує наявність мікро- та мезопор у структурі вуглецевих матеріалів). Аналіз диференційного розподілу пор підтвердив, що тривалість активації визначає не лише загальний об'єм і площу пор, а й характер їх перерозподілу.

Для більш повної оцінки загальної пористої структури матеріалів розглянуто залежність сумарного об'єму та площі пор від діаметра пор. Криві (рис. 10) демонструють зростання об'єму та площі поверхні при діаметрах від 0,6 до 24 нм, з незначним внеском пор понад 24 нм.

За даними таблиці 3, мезопори становлять 72–95% об'єму, з максимальною питомою площею $831\text{--}940\text{ м}^2/\text{г}$ для зразків серії LH30–LH120 завдяки мікропорам. Таким чином, метод керованої термічної активації дозволяє цілеспрямовано регулювати співвідношення мікро- та мезопор.

Для подальшого збільшення середнього діаметра пор, модифікації пористої структури та потенційного підвищення питомої поверхні проведено активацію аналогічних вуглецевих матеріалів при температурах 450 °С та 500 °С. У процесі дослідження вуглецевих матеріалів серій LD було встановлено, що підвищення температури та часу активації суттєво впливає на розвиток їхньої пористої структури. Ізотерми адсорбції/десорбції азоту підтвердили наявність як мікро-, так і мезопор.

У ході дослідження вуглецевих матеріалів серії LF, встановлено залежність формування пористої структури від тривалості активації. Отримані результати свідчать про те, що вуглецеві матеріали серії LF, активовані при 500 °С, демонструють чітку залежність пористої структури від тривалості активації.

Наступним етапом нашого дослідження є визначення фрактальної розмірності активованих вуглецевих матеріалів, що дозволяє кількісно оцінити рівень шорсткості та структурної складності пористої системи (моделі Френкеля–Хелсі–Хілла (FHH)). Метод передбачає побудову залежностей $\lg V$ від $\lg(\lg(P_0/P))$, відповідно до наступного рівняння представленого на слайді:

$$\lg \frac{V}{V_0} = A \left(\lg \left(\lg \left(\frac{P_0}{P} \right) \right) \right) + const, A - \text{нахил лінійної ділянки графіка, пов'язаний із}$$

фрактальною розмірністю поверхні, що дає змогу виділити лінійні ділянки у різних інтервалах відносного тиску. Апроксимація цих ділянок (рис. 14) дозволяє визначити величину A – нахил прямої, за яким розраховується фрактальна розмірність.

У діапазоні I рис. 14 (моношарова адсорбція) вихідний зразок L характеризується фрактальною розмірністю 2,19, що вказує на певну шорсткість та неоднорідність поверхні. У діапазоні II (багатошарова адсорбція) значення D є вищими (2,56–2,73), що відображає зростання ефективної шорсткості при багатошаровому заповненні пор молекулами азоту. Максимальні значення спостерігаються для зразків LH90–LH120 ($D = 2,73$), які відповідають найбільш інтенсивному розвитку пористої структури. При подовженні часу активації (LH150–LH240) відмічається поступове зменшення

D до 2,564, що вказує на вирівнювання морфології та зниження структурної складності.

Для детального вивчення пористої структури доцільно поєднувати газоадсорбційний метод із малокутовим X-променевим розсіянням (SAXS). Криві SAXS, отримані для вихідного зразка L та ряду термічно модифікованих зразків (LN30–LN240), наведені на рис. 15. Для вихідного зразка (L) характерна експоненціальна залежність інтенсивності від хвильового вектору без виражених максимумів, що вказує на відсутність впорядкованої пористої структури.

Для кількісного аналізу результатів SAXS застосовано методи Гіньє та Порода. Метод Гіньє дозволяє оцінити середній розмір пор чи агрегованих доменів через визначення радіуса гірації (R_g). Криві на (рис. 16) для всіх зразків мають лінійні ділянки, що підтверджує коректність використання цього підходу.

Для отримання більш наочного уявлення про фізичні розміри пор у нанопористих вуглецевих матеріалах, обчислені радіуси гірації (R_g) (таблиця 7), отримані з кривих Гіньє, було використано для оцінки ефективного радіуса пор (R_p). З цією метою було застосовано модель, в якій пори наближено до сферичної форми, і для однорідної сфери радіус гірації пов'язаний з її геометричним радіусом співвідношенням: $R_g = \sqrt{\frac{3}{5}} \cdot R_p$. Отримані результати представлено на рисунку 17 та використано для подальшої інтерпретації змін у пористій структурі внаслідок термічної активації.

Якщо метод Гіньє дозволяє визначати характерні розміри мезопор лише в області малих розсіювальних векторів, Метод Порода використовується в області великих значень s . Криві X-променевого розсіювання побудовані в координатах Порода для вихідного (L) та термічно активованих вуглецевих матеріалів (LN30–LN240), наведені на рисунку 18. Для всіх вуглецевих матеріалів індекс Порода змінюється в межах 2,4 – 4,1 (таблиця 8), що вказує на залежність структурних властивостей від ступеня активації зразка. Спостерігається періодичне чергування гладких і фрактальних характеристик,

що може бути пов'язано з механізмом формування пор під час термічної обробки.

Процес активації пористих вуглецевих матеріалів є важливим етапом їхнього отримання та вдосконалення, оскільки саме він визначає структурні й функціональні властивості цих матеріалів. Активація призводить до розвитку пористості, збільшення питомої поверхні, а також зміни ступеня впорядкованості графеноподібних доменів. Вивчення цих змін здійснюється за допомогою методу раманівської спектроскопії, який є високочутливим до структурних дефектів та характеру зв'язків у вуглецевій матриці. На раман-спектрах вуглецевих матеріалів основними є D- та G-смуги. D-смуга ($\sim 1350 \text{ см}^{-1}$) відображає наявність дефектів, порушення симетрії та присутність sp^3 -гібридизованих атомів вуглецю. Її інтенсивність зростає зі збільшенням кількості дефектів у структурі. G-смуга ($\sim 1580 \text{ см}^{-1}$) відповідає коливанням sp^2 -гібридизованих атомів у графенових площинах і свідчить про розвиток впорядкованих графітових доменів. Аналіз співвідношення інтенсивностей цих смуг (ID/IG) дозволяє кількісно оцінити ступінь графітизації та рівень дефектності матеріалу. Таким чином, аналіз раманівських спектрів дозволяє не лише якісно описати структурні зміни, а й визначити оптимальні умови активації для досягнення високого ступеня впорядкованості та покращених електрофізичних властивостей пористих вуглецевих матеріалів.

Нанопористий вуглецевий матеріал (НВМ) завдяки великій питомій поверхні широко застосовується як активна речовина електродів. Однак низька електропровідність НВМ зумовлює необхідність використання струмопровідних добавок. У нашій роботі досліджено вплив графіту (Aldrich), окисленого графіту, терморозширеного графіту та сажі (Super-P, Китай) на провідність і ємність композитних електродів. Електрохімічні властивості вивчали в двохелектродній комірці з 33 % розчином КОН (рис. 22). Отримані імпедансні спектри (діаграми Найквіста рис.23) показали низькі значення загального опору, що вказує на переважно ємнісний механізм накопичення заряду. У низькочастотній області криві мають майже вертикальний характер,

що підтверджує типову поведінку ЕК. Це означає добрий контакт електродів з електролітом.

На основі аналізу діаграм Найквіста (рис.24) було проведено розрахунок ємності для різних електрохімічних систем (композит НВМ/струмопровідна добавка)/електроліт). З імпедансних кривих визначено питому ємність електрохімічної системи. Аналіз діаграм Найквіста (рис.25) при різних напругах показав, що електродні процеси добре описуються еквівалентною електричною схемою, де враховано як опір електроліту й контактів, так і дифузійні процеси в мікро- та мезопорах. Таким чином, результати демонструють, що вибір струмопровідної добавки суттєво впливає на параметри еквівалентної електричної схеми. Сажка Super-P забезпечує найкраще поєднання низького опору та високих ємнісних характеристик, що робить її оптимальною для використання в електрохімічних конденсаторах.

Для оцінки впливу типу струмопровідної добавки на ефективність, стабільність та питому ємність НВМ (зразок L) проводили гальваностатичні тестування ЕК при струмах заряду/розряду від 10 до 200 мА в умовах, наближених до реального використання. Представлені розрядні криві (рис. 26) мають характерну для суперконденсаторів майже лінійну форму зміни напруги з часом, що свідчить про домінуючий механізм накопичення заряду за рахунок ємності ПЕШ. Отримані заряд/розрядні криві при постійному струмі були використані для розрахунку питомої ємності НВМ та спаду напруги на ЕК за

формулою представленої на слайді: $C_{\text{пит}} = \frac{2 \cdot I \cdot \Delta t}{\Delta U \cdot m}$, $m = 0,1875$ г – маса НВМ

одного електрода). З рис. 27 видно, що найкращі показники питомої ємності має композит з Super-P (100–123 Ф/г). Для графіту та окисненого графіту ємність дещо нижча (85–115 Ф/г), тоді як для ТРГ вона найменша (70–110 Ф/г) і швидко падає при підвищенні струму. Оцінка внутрішнього опору рис.28 показала, що для композиту з Super-P спад напруги не перевищує 0,15В у всьому діапазоні струмів.

Для детального аналізу кінетики процесів, механізмів накопичення заряду та внутрішніх обмежень електрохімічних конденсаторів було проведено

потенціодинамічні дослідження методом циклічної вольтамперометрії (ЦВА) при різних швидкостях сканування. Представлені на рис. 29 ЦВА-криві мають квазіпрямокутну форму, що характерно для механізму накопичення заряду у подвійних електричних шарах. Відсутність виражених фарадеївських піків свідчить про мінімальний внесок псевдоємності. При підвищених швидкостях сканування форма кривих дещо спотворюється, що вказує на зростання внутрішнього опору (ESR) та кінетичні обмеження іонного транспорту. Розрахунки питомої ємності (рис. 30) підтвердили очікуване зменшення її значень із підвищенням швидкості сканування.

Наступні електрохімічні дослідження проводилися з добавкою сажа Super-P. Годографи імпедансу для всіх зразків показують типові характерну для ЕК форму з невеликою «індуктивною» ділянкою у високочастотній області. Як видно з рисунків представлених на даному слайді всі досліджувані ЕК мають низький опір R_s і невеликий опір переносу заряду, що вказує на добрий контакт електродів з електролітом та високу електрохімічну активність вуглецевого матеріалу серії LH. Значення питомої ємності обчислювалось за формулою представленої на слайді. рис. 35) згідно наступного співвідношення подано на

слайді $C_{min} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot Z'' \cdot m}$, де f – частота (10 МГц), Z'' – значенням уявної

складової імпедансу при частоті f , m – маса активного матеріалу одного електрода ($m = 0,1875$ г). Як видно з рисунку 32 для всіх зразків характерним є зниження ємності зі зростанням напруги, що відповідає типовій поведінці електрохімічних конденсаторів з подвійним електричним шаром. Найвищу питому ємність (80-90 Ф/г) демонструє LH30 (рис. 32 (а), Також високі значення та найбільш збалансовані характеристики спостерігаються для зразків LH150 і LH180 (~65 Ф/г при низьких напругах), що може свідчити про оптимальне поєднання мікро- та мезопор (рис. 32 (б)). На основі отриманих кривих ЦВА (рис.33) було розраховано питому ємність вуглецевих матеріалів серії LH. Для всіх зразків спостерігається зменшення питомої ємності зі зростанням швидкості сканування (рис. 34). Це типова поведінка для пористих вуглецевих матеріалів, оскільки при високих швидкостях сканування іони

електроліту не встигають проникнути в мікропори, і накопичення заряду відбувається переважно на зовнішній поверхні та в мезопорах.

Загальна питома ємність (C) активованих вуглецевих матеріалів складається з ємності подвійного електричного шару ($C_{ПЕШ}$) та фарадеївської ємності (C_{ϕ}). (Фарадеївська ємність (псевдоємність) залежить від часу, необхідного для протікання реакцій.), Припускаючи, що швидкість сканування обернено пропорційна часу дифузії, фарадеївську ємність можна представити як $C_{\phi} = a\sqrt{s}$, де a – константа), загальну ємність обчислювали за формулою представленою на слайді $C = C_{s \rightarrow \infty} + a\sqrt{s}$, де $C_{s \rightarrow \infty} = C_{ПЕШ}$.) З отриманих залежностей (рис. 34 (а)) було визначено максимальну питому ємність НВМ та $C_{ПЕШ}$ (табл. 10).

Гальваностатичні дослідження проводились при різних розрядних струмах. Максимальний робочий струм визначався із миттєвого падіння напруги при розряді. Використовуючи гальваностатичні криві визначено питому ємність НВМ та спад напруги при розряді ЕК для різних серій матеріалів, (зокрема на рис.36 представлено питому ємність матеріалу серії LH, на рис. 37 – серії LD і на38 – серії LF). Як видно з рис. 36, для всіх композитів спостерігається загальна тенденція до зниження питомої ємності зі збільшенням струму заряду/розряду. Для всіх досліджених ЕК спостерігається лінійне зростання спаду напруги (ΔU) зі збільшенням зарядно-розрядного струму (рис. 37 (а)), що відображає величину внутрішнього опору пристрою. У більшості ЕК значення ESR демонструє відносно стабільну залежність від струму або незначне зростання/зменшення зі збільшенням навантаження (рис. 38 (б)).

В дисертації зроблено наступні висновки:

1 Отримані результати комплексного аналізу пористої структури вуглецевих матеріалів свідчать про ефективність застосування термохімічної активації для формування ієрархічної системи пор. Внаслідок термохімічної активації вихідної сировини отримано нанопористі вуглецеві матеріали з площею поверхні $700 \text{ м}^2/\text{г}$ та загальним об'ємом пор $0,7 \text{ см}^3/\text{г}$, що характеризуються поєднанням мікропор та мезопор, де основний внесок у

питому площу поверхні та об'єм роблять мікропори розміром 0,65-1,25 нм, а мезопори діаметром 2-5 нм забезпечують ефективний доступ до них. Завдяки поєднанню високої питомої площі поверхні, значного об'єму мікропор і присутності транспортних мезопор, даний матеріал є перспективним для подальшої модифікації і прогнозованого впливу на пористу структуру.

2. Показано, що всі термічно активовані вуглецеві матеріали мають мезопористу структуру з розміром пор близько 2-3 нм. Для матеріалів активованих при 400 °С, характерне поступове збільшення питомої площі поверхні та об'єму пор до певного критичного часу активації близько 120 хв. Зростання площі поверхні до 940 м²/г відбувається переважно за рахунок розвитку мікропор, тоді як мезопори формуються поступово і забезпечують близько 70-95 % від загального об'єму пор, що вказує на помірно мезопористу структуру при збереженні значної частки мікропор. Матеріали активовані при 450 °С, характеризуються активнішим перерозподілом пор у діапазоні 0,65-2,25 нм. На початку переважають мікропори (0,65-1,25 нм), однак із подовженням часу активації відбувається розширення та злиття мікропор, що сприяє зростанню частки мезопор. Площа поверхні при цьому залишається високою (понад 800 м²/г), а питома частка мезопор у загальному об'ємі сягає 70-85 %. Це свідчить про перехід від переважно мікропористої до комбінованої структури з добре розвиненою мережею мезопор. Найбільші зміни фіксуються у серії активованій при 500 °С. Зі зростанням часу активації спостерігається спочатку активний розвиток ультрамікропор і мікропор (0,65-1,25 нм), що відображається у різкому зростанні площі поверхні. Проте подальше подовження активації (> 90-120 хв) супроводжується злиттям дрібних пор і формуванням розвиненої системи мезопор (> 2 нм), що підтверджується збільшенням об'єму мезопор до 80-90 % від загального об'єму. Це свідчить про переорієнтацію текстури з вузької мікропористої до поєднання мікро- і мезопористої структури з акцентом на мезопори. Таким чином, зростання температури термічної активації від 400 до 500 °С і подовження її тривалості дозволяє керовано змінювати співвідношення мікро- та мезопор, збільшуючи внесок мезопор та зберігаючи високі значення питомої площі поверхні (500-900

м²/г). Така багаторівнева пориста структура забезпечує хороші перспективи для застосування цих матеріалів у адсорбційних і електрохімічних системах, де поєднання мікропор для сорбції і мезопор для транспортної доступності електроліту є визначальним.

3. Встановлено, що фрактальна розмірність поверхні термічно активованих пористих вуглецевих матеріалів, визначена за модифікованим методом Френкеля-Хелсі-Хілла на основі ізотерм адсорбції азоту, відображає зміни топографії та пористої структури залежно від часу термічної активації. У діапазоні моношарової адсорбції фрактальна розмірність вихідного зразка становить $D=2,19$, вказуючи на помірну шорсткість поверхні. На початкових етапах активації (час до 90 хв.) значення D зростає до 2,466, що свідчить про розвиток мікропористої структури та підвищення нерівномірності поверхні через утворення нових пор. При подальшій активації (120-240 хв.) D знижується до 1,812, що вказує на консолідацію структури, злиття пор і вирівнювання поверхні. У діапазоні багатошарової адсорбції значення D вищі (2,56-2,73), з піком для часу активації 90-120 хв., що відображає максимальну шорсткість і розвиненість пористої структури. Подальша термічна обробка призводить до зменшення фрактальної розмірності ($D = 2,56$), що вказує на часткове вирівнювання поверхні.

4. На основі аналізу кривих, отриманих методом SAXS, побудованих у координатах Гінье визначено радіуси гірації вуглецевих матеріалів, які варіюються в межах від ~2.7 до ~3.5 нм. Показано, що максимальне значення радіуса гірації ($R_g = 3,53$ нм) відповідає часу термічної обробки 150 хв. та свідчить про формування максимально розвинутої мезопористої структури.

5. З аналізу раманівських спектрів встановлено, що термічна активація НВМ впливає на їхню структуру, зокрема на ступінь графітизації, дефектність і розмір графітових доменів. Показано, що структура вихідного зразка є аморфною з великою кількістю дефектів. Для всіх температурних режимів зі збільшенням часу активації до 120 хв. відбувається зростання графітизації. Подальший час активації НВМ призводить до зростання дефектності через структурну деградацію. Таким чином, активація НВМ при 500°C впродовж 90-

при вищих температурах. Низькі/помірні температури і короткі часи (до ≈ 90 – 120 хв) сприяють наростанню мікропористості та збільшенню питомої площі; підвищення температури або подовження часу викликає термічне "вилиття"/вигорання частинок, розширення і коалесценцію пор, зростання частки мезопор і поступове зниження питомої площі через консолідацію та часткову деградацію структури. ВН коректно відображає еволюцію мезопор (2 – 50 нм), тоді як DFT виявляє зміни в ультра- та мікропорах (< 2 нм); сумарно методи підтверджують перехід від домінування мікропор до комбінованої мікро–meso/meso-структури при жорсткіших режимах активації.

4. Д. ф.-м. н., проф. Будзуляк І. М.:

Від чого на Вашу думку залежить розподіл в порах в зразках спалених при 400° , 450° , 500° ?

Лісовська С.А. Розподіл пор у зразках залежить насамперед від температури спалювання, яка визначає інтенсивність термічного розкладу та ступінь вигорання органічних компонентів. При нижчій температурі (400°C) переважає формування дрібних мікропор через часткове видалення летких речовин. З підвищенням температури до 450 – 500°C процес стає інтенсивнішим: пори розширюються, з'являються нові канали, можливе утворення мезопор. Таким чином, розподіл пор залежить від співвідношення швидкості газоутворення та стабільності карбонової матриці, що визначає розвиток мікро- і мезопористої структури.

5. Д. ф.-м. н., проф. Яремій І.П.:

Як зміна температури та тривалості термічної активації впливає на співвідношення інтенсивностей D- та G-смуг у раманівських спектрах пористих вуглецевих матеріалів, і що це дозволяє встановити щодо ступеня графітизації, дефектності та середнього розміру графеноподібних доменів?

Лісовська С.А. Зміна температури та тривалості термічної активації впливає на співвідношення D- і G-смуг у раманівських спектрах: спочатку зростає ступінь графітизації та збільшується розмір доменів, а при надмірній активації зростає дефектність і відбувається деградація структури.

6. Д. ф.-м. н., проф. Бойчук В.М.

Яке значення має визначення фрактальної розмірності поверхні вуглецевих матеріалів і що воно дозволяє встановити щодо їхньої структури та властивостей?

Лісовська С.А. Визначення фрактальної розмірності поверхні вуглецевих матеріалів воно дозволяє кількісно оцінити ступінь шорсткості та неоднорідності поверхні. Зі зміною фрактальної розмірності можна встановити, як змінюється топографія та розподіл пор при термічній активації: зростання значення D свідчить про розвиток мікропористої структури та підвищення нерівномірності поверхні, тоді як зниження — про злиття пор і вирівнювання структури. Таким чином, аналіз фрактальної розмірності дає змогу простежити механізми формування пористої текстури та спрогнозувати вплив цих змін на адсорбційні й електрохімічні властивості матеріалів.

7. К. ф.-м. н., проф. Никируй Л.І.:

Як тип струмопровідної добавки впливає на питомі ємнісні характеристики нанопористих вуглецевих матеріалів? Чому сажа (Super-P) виявилась найбільш ефективною серед досліджених струмопровідних добавок?

Лісовська С.А. Тип струмопровідної добавки безпосередньо впливає на питомі ємнісні характеристики нанопористих вуглецевих матеріалів, оскільки визначає ефективність перенесення заряду всередині електродної маси. Добавки з кращою електропровідністю та більш розвиненою контактною поверхнею з частинками вуглецевого матеріалу забезпечують нижчий опір, швидший рух іонів та стабільніше накопичення заряду, що підвищує ємність ЕК. Сажа (Super-P) виявилась найбільш ефективною, тому що має високу електропровідність, оптимальну дисперсність і розвинену поверхню, завдяки чому вона рівномірно покриває частинки вуглецевого матеріалу та формує ефективну провідну мережу. Це зменшує внутрішні опори й втрати енергії, забезпечуючи вищу питому ємність та стабільність роботи конденсаторів.

4. Виступ наукового керівника доктора фізико-математичних наук, професора кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Ільницького Р.В.:

Лісовська Світлана Андріївна вчасно виконувала всі розділи індивідуального плану наукової роботи в установлені терміни. Своєчасність та

повнота виконання індивідуального плану аспірантки підтверджена результатами піврічної проміжної, підсумкової (річної) та заключної атестацій.

Аспірантка Світлана Лісовська самостійно виконувала експериментальні дослідження та опрацювала великий об'єм наукової літератури. Основні результати, отримані в процесі виконання роботи в повній мірі опубліковані в наукових фахових виданнях.

Вважаю, що дисертація Лісовська Світлана Андріївна на тему «Структура, морфологія та електрохімічні властивості електродних матеріалів систем накопичення заряду», повністю відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 № 44 (зі змінами) та може бути представлена захисту в разовій спеціалізованій вченій раді.

5. Виступи присутніх членів семінару з оцінкою дисертації

Д. ф.-м. н., проф. Будзуляк І.М.:

Дисертація містить велику кількість матеріалу, який отримано експериментально, а також велику кількістю застосованих методів дослідження. У цілому, дисертація відповідає всім вимогам і може бути допущена до захисту.

Д. ф.-м. н., проф. Коцюбинський В.О.:

Дисертаційна робота є цікавою та актуальною. Робота має як наукове, так і практичне значення, отримані висновки дослідження можна використовувати для подальших дослідження. Вважаю роботу комплексною та такою, що може бути допущена до розгляду в разовій спеціалізованій вченій раді.

Д. ф.-м. н., проф. Рачій Б.І.:

Робота Лісовської Світлани Андріївни є комплексною, зроблена велика кількість досліджень та здійснено аналіз фізичних та хімічних характеристик. Робота виконана послідовно і логічно завершена, починаючи від синтезу і закінчуючи створенням пристроїв накопичення електричної енергії. Результати роботи опубліковані в наукових журналах, які входять до наукометричної бази

Scopus, тому я вважаю, що дисертантка заслуговує того, щоб представити свою роботу на захисті в разовій спеціалізованій вченій раді.

Під час обговорення позитивну оцінку дисертації Світлани Лісовської висловили всі члени семінару.

Заслухавши публічну презентацію наукових результатів дисертації Лісовської Світлани Андріївни та обговоривши її на фаховому семінарі кафедри прикладної фізики і матеріалознавства прийнято наступні висновки щодо дисертації: рекомендувати для подання до розгляду та захисту в разовій спеціалізованій вченій раді.

6. Висновок про перевірку дисертації та наукових публікацій здобувачки на виявлення порушення академічної доброчесності (до витягу додається довідка з підписом проректора з наукової роботи університету).

УХВАЛИЛИ:

ПРИЙНЯТИ такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації:

Висновок
наукового фахового семінару кафедри прикладної фізики і матеріалознавства фізико-технічного факультету Карпатського національного університету імені Василя Стефаника про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Структура, морфологія та електрохімічні властивості електродних матеріалів систем накопичення заряду» здобувачки ступеня доктора філософії Лісовської Світлани Андріївни за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали (галузь знань 10 Природничі науки)

1. Актуальність теми

Сучасний розвиток енергетики та електроніки вимагає створення нових систем зберігання енергії, здатних поєднувати високу густину енергії та потужності з тривалим терміном служби і низькою вартістю. Серед таких пристроїв особливе місце посідають електрохімічні конденсатори, які за графіком Ragone займають проміжне положення між традиційними

конденсаторами та акумуляторами, забезпечуючи швидку зарядку/розрядку та високий ресурс циклів. Ключову роль у досягненні їхніх характеристик відіграють електродні матеріали, насамперед вуглецеві. Вуглецеві матеріали вирізняються високою питомою площею поверхні, електропровідністю, хімічною стабільністю та відносною доступністю синтезу з недорогих прекурсорів. Активовані, карбідопохідні, шаблонні вуглеці, нанотрубки, цибулиноподібний вуглець та графен демонструють різні морфологічні та електрохімічні властивості, що відкриває можливість оптимізації роботи ЕК для конкретних застосувань. Дослідження структури й морфології таких матеріалів дозволяє підвищити їх ємність і потужність, а також розробити нове покоління високоефективних систем накопичення заряду.

Таким чином, дослідження структури, морфології та електрохімічних властивостей електродних матеріалів є ключовим завданням сучасної науки про накопичення енергії, оскільки воно забезпечує можливість зміщення кривої Ragone суперконденсаторів у область більш високої енергетичної щільності при збереженні їхніх традиційних переваг — високої питомої потужності, довговічності та безпечності.

2. Зв'язок з науковими програмами, планами, темами

Дисертація виконана у наукових лабораторіях кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Карпатського національного університету імені Василя Стефаника у рамках наукових досліджень кафедри прикладної фізики і матеріалознавства.

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Основні ідеї, наукові положення та теоретичні висновки дисертації сформовані авторкою особисто. Напрацювання, що належать співавторам, у роботі не використовувалися.

4. Теоретичне та практичне значення результатів дисертації:

результати дисертації можуть бути основою для подальших наукових досліджень та розробки нових електродних матеріалів, задля збільшення електрохімічних показників пристроїв накопичення та зберігання енергії. Результати дисертації можуть мати важливий внесок у розвиток нових

енергоефективних технологій, знизити вартість та підвищити ефективність пристроїв накопичення та зберігання енергії. Представлені в роботі підходи та методи можуть бути використані (і вже частково використовуються) при навчанні студентів природничих та технічних спеціальностей.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації зумовлений поставленими завданнями та результатами їх розв'язання. У роботі:

1) комплексно досліджено еволюцію мікро- та мезопористої структури активованих вуглецевих матеріалів з сировини рослинного походження у залежності від температури та тривалості термічної активації;

2) встановлено взаємозв'язок між фрактальною розмірністю поверхні та пористою текстурою матеріалів, що визначає їхні адсорбційні та електрохімічні властивості;

3) визначено, що регулювання температури й тривалості активації дозволяє керувати зміною співвідношення мікро- та мезопор, формуючи ієрархічну структуру з високою питомою площею поверхні;

4) виявлено вплив типу струмопровідної добавки на питомі ємнісні характеристики матеріалу та мінімізацію внутрішнього опору;

5) обґрунтовано взаємозв'язок між часом, температурним режимом термічної активації та питомими енергетичними характеристиками отриманими нанопористими вуглецевими матеріалами.

6. Використання (апробація) результатів роботи

Представлені в дисертаційній роботі результати були оприлюднені та обговорювалися на: конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання 2021» (5-7 квітня 2021 року), V Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Нанотехнології і наноматеріали у фармації та медицині» (23 квітня 2021 року), Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2022» (18-20 жовтня 2022 року), VIII Міжнародна науково-практична конференція «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи» (18-19 жовтня 2024 року), International Students and Young

Scientists Conference in Theoretical and Experimental Physics HEUREKA-2025 (May 13-15 2025).

Результати дослідження обговорювалися на щорічних звітних наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів і докторантів Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника 2020-2025 рр. (академічна відпустка з 01.12.2023 року до 30.11.2024 року (наказ № 1001 від 05.12.2023 року) та 01.12.2024 до 30.11.2025 академічна відпустка у зв'язку із сімейними обставинами (догляд за хворою матір'ю) (наказ № 995 від 29.11.2024 року)).

7. Особиста участь автора – одержання наукових та практичних результатів, що викладені в дисертації.

Дисертація виконана на кафедрі прикладної фізики і матеріалознавства.

Робота є результатом самостійних досліджень Лісовської Світлани Андріївни.

8. Перелік публікацій за темою дисертації. За результатами досліджень опубліковано 9 наукових праць, у тому числі:

– 4 статті, у фахових наукових журналах, які індексуються наукометричною базою Scopus;

– 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Публікації, що індексуються в міжнародних наукометричних базах:

1) Ivanichok N., Budzuliak I., Moiseienko M., Lisovskiy R., Rachii B., Gamarnyk A., Turovska L. and Lisovska S. Electrochemical properties of nanoporous carbon materials obtained from raw materials of plant origin (hemp shives). *Physics and Chemistry of Solid State*, 2020, 21(1), 35-42.

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.35-42>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85084437875?inward=>

2) Lisovska S., Ilnytskyy R., Lisovsky R., Ivanichok N., Bandura Kh., Rachiy B. Structural and sorption properties of nanoporous carbon materials obtained from walnut shells. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2023, 24(2), 348-353.

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.24.2.348-353>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85167686717?inward=>

3) Lisovska S., Ivanichok N., Klymkovych S., Lisovsky R., Merena R., Lysiv T., Mandzyuk V., Rachiy B. Structural and Morphological Properties of Nanoporous Carbon Materials Obtained from Biomass. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2025, 17(1), 01025(6pp).

DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.17\(1\).01025](https://doi.org/10.21272/jnep.17(1).01025)

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/86000777988?inward=>

4) Budzulyak I., Yablon L., Budzulyak I., Kotsyubynsky A., Lisovska S., Ivanichok N. Laser modification of electrode carbon material, doped with erbium and chrome. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2025, 33(8), 829-832.

DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2025.2464194>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105011815536?inward=>

Публікації в збірках наукових конференцій:

5. Лісовська С.А., Ільницький Р.В., Лісовський Р.П. Електрохімічні властивості нанопористих вуглецевих матеріалів, отриманих із костри коноплі. *Лашкарівські читання – 2021: тез доп. конф. молодих вчених з фізики напівпровідників з міжнар. участю, м. Київ, 5-7 квітня 2021 р. / Інст. фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкаріова, Київ, 2021. С. 21-22.*

URL: [https://drive.google.com/file/d/13RO-UyYff7GK1-](https://drive.google.com/file/d/13RO-UyYff7GK1-Rk6puz3kngzYEkUDF2/view)

[Rk6puz3kngzYEkUDF2/view](https://drive.google.com/file/d/13RO-UyYff7GK1-Rk6puz3kngzYEkUDF2/view)

6. Лісовська С.А., Ільницький Р.В., Рачій Б.І., Лісовський Р.П. Синтез та сорбційні властивості нанопористого вуглецю з рослинної сировини (шкаралупи горіха). *Нанотехнології і наноматеріали у фармації та медицині: матеріали V всеукраїнської наук.-практ. інтернет-конф. з міжнар. участю, м. Харків, 23 квітня 2021 р. / НФаУ, Харків, 2021. С. 47.*

URL: <https://inorgchem.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2021/05/nano-2021-book.pdf>

7. Лісовська С.А., Рачій Б.І., Іванічок Н.Я., Ільницький Р.В., Лісовський Р.П. Сорбційні властивості вуглецевих матеріалів, отриманих із сировини рослинного походження (шкаралупи горіха). *ЕВРИКА-2022: матеріали Міжнар. конф. студ. і молодих наук. з теоретичної та*

експериментальної фізики, м. Львів, 18-20 жовтня 2022 р. / Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, Львів, 2022, С. 14.

URL:<https://physics.lnu.edu.ua/conferences/heureka2022/files/Heureka2022.pdf>

8. Lisovska S., Lysiv T., Ivanichok N., Ilnytskyi R., Soltys A., Rachiy B. Preparation And Sorption Properties Of Nanoporous Carbon. Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. м. Луцьк, 18-19 жовтня 2024 р. / Луцький нац. техн. ун-т, Луцьк, 2024.

URL: https://drive.google.com/file/d/1Vb5l3wdr-ZPvTvxiBzYdOxY4C_V5Autq/view

9. Lisovska S., Borchuk D., Lysiv T., Bedriy T., Ivanichok N., Rachiy B. Study of the porous structure of carbon materials. HEUREKA-2025: intern. stud. and young sci. conf. in theoretical and experimental phys., Lviv, May 13-15, 2025 / Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, Львів, 2025, С. 5.

URL:<https://physics.lnu.edu.ua/conferences/heureka2025/files/Heureka2025.pdf>

1. Наукове значення виконаного дослідження

Наукове значення проведеного дослідження полягає у створенні наукової бази для розробки нових високоефективних енергетичних технологій. Контрольовані параметри активації (температура та час обробки) дозволяють керувати регулювати співвідношення мікро- та мезопор, площу поверхні та ступінь графітизації, що безпосередньо впливає на електрохімічні характеристики матеріалів. Це створює науково обґрунтовану основу для оптимізації пористої структури електродів з метою підвищення їх ємності, провідності та стабільності в системах накопичення енергії. Отримані результати можуть бути використані для глибшого розуміння механізмів накопичення і переносу заряду в складних матеріалах, що є ключовим для вдосконалення акумуляторів, суперконденсаторів та гібридних систем зберігання енергії. Дослідження також довели вплив типу струмопровідних добавок на ємнісні характеристики електродів, зокрема підтверджено ефективність застосування ацетиленової сажі, яка забезпечує максимальну питому ємність і зменшення внутрішнього опору. Це відкриває перспективи

для цілеспрямованої розробки композитних матеріалів із заданими електрохімічними параметрами.

2. Практична цінність результатів дослідження

Результати можуть бути використані при створенні електродів нового покоління для електрохімічних конденсаторів із підвищеною питомою ємністю та стабільністю. Запропоновані підходи до регулювання пористої структури і морфології вуглецевих матеріалів забезпечують можливість оптимізації їхньої текстури під конкретні задачі енергетики, сорбційних і каталізаторних технологій. Отримані закономірності формування мікро- та мезопор є основою для розробки високоефективних ієрархічних наноструктурованих матеріалів для систем зберігання та перетворення енергії.

3. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення.

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України.

За результатами фахового семінару зроблено висновки:

1. Дисертація Лісовської Світлани Андріївни на тему «Структура, морфологія та електрохімічні властивості електродних матеріалів систем накопичення заряду» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретні наукове завдання, а саме: термохімічна активація є ефективним методом отримання нанопористих вуглецевих матеріалів з розвиненою мікро- та мезопористою структурою, збільшення температури та часу активації дозволяє керувати співвідношенням мікро- та мезопор, що зберігає високу питому площу поверхні та забезпечує перспективність матеріалів у адсорбційних і електрохімічних системах, фрактальна розмірність поверхні вуглецевих матеріалів змінюється залежно від тривалості активації, що відображає розвиток, консолідацію та злиття пористої структури, SAXS-аналіз показав, що максимальний розвиток мезопористої структури відповідає часу термічної активації 150 хв, раманівські дослідження засвідчили, що оптимальні умови активації (500 °C, 90–120 хв.) сприяють підвищенню графітизації, зниженню дефектності та покращенню електропровідності матеріалів, тип струмопровідної добавки суттєво впливає на електрохімічні характеристики,

причому ацетиленова сажа забезпечує найвищу питому ємність та мінімальний внутрішній опір, контроль температури й часу активації дозволяє отримати матеріали з ієрархічною пористою структурою, що забезпечує високу питому ємність і хорошу кінетику заряду/розряду в суперконденсаторах, що має важливе значення для галузі знань 10 Природничі науки.

2. За темою дисертації опубліковано 9 наукових публікацій, де в значній мірі відображені основні результати дисертації, з них 4 публікації у журналах, які індексуються наукометричними базами Scopus та 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

3. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12 січня 2017 р. (зі змінами) «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).

4. Рекомендувати дисертацію «Структура, морфологія та електрохімічні властивості електродних матеріалів систем накопичення заряду», подану Лісовською Світланою Андріївною на здобуття ступеня доктора філософії, для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді Карпатського національного університету імені Василя Стефаника.

5. Розглянувши заяви і документи голови, рецензентів і опонентів, та встановивши, що подані документи відповідають вимогам до членів спеціалізованої вченої ради згідно «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами), пропонувати вченій раді Університету призначити наступний склад разової ради:

Голова разової спеціалізованої вченої ради:

– доктор фізико-математичних наук, професор Гасюк Іван Михайлович, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника,

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства (за сумісництвом), декан фізико-технічного факультету.

1. Vakalyuk, A. V., Vakalyuk, V. M., Voitkiv, H. V., & Gasiuk, I. M. (2024). Investigation of the frequency dispersion of the complex permittivity of lithium-iron spinel doped with La, Y. *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(3), 492-497.

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.492-497>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85207624198?origin=resultslist>

ISSN: 17294428

Ключові слова: hopping mechanism of conduction, impedance spectroscopy, fractal structure, frequency dispersion of dielectric permittivity, dielectric susceptibility, dielectric loss angle

2. Vakalyuk, A. V., Gasiuk, I. M., & Vakalyuk, V. M. (2024). The temperature dependence investigation of the frequency dispersion of the electrical properties of lithium-iron spinel doped with La, Y. *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(1), 148-156.

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.1.148-156>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85189008539?origin=resultslist>

ISSN: 17294428

Ключові слова: Hopping mechanism of conductivity, Activation energy, Impedance spectroscopy, Arrhenius curves, Frequency dispersion of electrical conductivity, Spinel

3. Sklepova, S. V., Gasyuk, I. M., Ivanichok, N. Y., Kolkovskiy, P. I., Kotsyubynsky, V. O., & Rachiy, B. I. (2022). The porous structure of activated carbon-based on waste coffee grounds. *Physics and Chemistry of Solid State*, 23(3), 484-490. (Scopus Україна)

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.484-490>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85141308514?origin=resultslist>

ISSN: 17294428

Ключові слова: carbon material, X-ray diffractometry, low-temperature porometry, porous structure

Рецензенти:

– доктор фізико-математичних наук, професор Коцюбинський Володимир Олегович, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики і матеріалознавства.

1. Budzuliak, I. M., Yablon, L. S., Kotsiubynskiy, V. O., Budzuliak, I. I., Ilnytskyi, R. V., Hlubitskiy, A. I., Ilnytskyi, N. R. (2024). Doping of porous activated carbon with Er, a metal with a high electronic states density. *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(4), 782-786.

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.782-786>

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85213238182&origin=resultslist>

ISSN: 17294428

Ключові слова: copper; erbium; high density of electronic states; porous carbon material; specific capacity.

2. Budzuliak, I. M., Yablon, L. S., Kotsyubynsky, V. O., Rachii, B. I., Budzuliak, I. I., Boychuk, V. M., Kryvulych, R. I. (2024). Interaction of electrolyte molecules with the surface of porous carbon: NMR study. *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(1), 212-216.

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.1.212-216>

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85189000941&origin=resultslist>

ISSN: 17294428

Ключові слова: Chemical shift; Electrolyte; NMR; Porous carbon.

3. Budzulyak I., Yablon L., Khemii M., Kotsyubynsky V., Ilnytskyi R., Rachiy B., Panko I. (2024). Fractal structure of laser-irradiated porous carbon material. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 32(4), 329–332. (Scopus)

DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2023.2282096>

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85177030618&origin=recordpage>

ISSN: 1536383X

Ключові слова: fractal; laser irradiation; porous carbon material; small-angle X-ray scattering.

– доктор фізико-математичних наук, професор Бойчук Володимира Михайлівна, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства.

1. Budzuliak, I. M., Yablon, L. S., Kotsyubynsky, V. O., Rachii, B. I., Budzuliak, I. I., Boychuk, V. M., Kryvulych, R. I. (2024). Interaction of electrolyte molecules with the surface of porous carbon: NMR study. *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(1), 212–216.

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.1.212-216>

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85189000941&origin=resultslist>

ISSN: 17294428

Ключові слова: porous carbon, NMR, chemical shift, electrolyte.

2. Zapukhlyak, R., Kotsyubynsky, V., Boychuk, V., Rachiy, B., Abaszade, R., Hoi, V., & Klymyuk, M. (2025). Structural Evolution of Porous Carbon Materials Derived from Hemp Fibers: Raman Spectroscopy Studies. *Physics and Chemistry of Solid State*, 26(1), 132–139.

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.26.1.132-139>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105001735170?origin=resultslist>

ISSN: 1729-4428

ISSN: 1729-4428

Ключові слова: porous carbon material, carbonization, activation, Raman spectroscopy, secondary raw materials

3. Ivanichok, N., Kolkovskiy, P., Ivanichok O., Rachi, B., Borchuk, D., Poveda, R., Ilnitsky, N., Boychuk, V. (2023). Fractal characteristics of porous carbon materials obtained from walnut shells. Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures 31(9), 828-832.

DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2023.2211696>

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85159127601&origin=resultslist>

Ключові слова: carbon nanoporous material, low-temperature porometry, fractal dimension, chemical elemental composition

Офіційні опоненти:

– доктор технічних наук, старший дослідник Івашишин Федір Олегович, Національний Університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства.

1. Szymczykiwicz E., Bordun I., Maksymych V., Klapchuk M., Kohut Z., Kulyk Y., Ivashchysyn F. (2024). Charge Storage and Magnetic Properties Nitrogen-Containing Nanoporous Bio-Carbon. *Energies*, 17(4), P. 903.

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85185705712&origin=resultslist>

DOI: <https://doi.org/10.3390/en17040903>

ISSN: 19961073

Ключові слова: impedance spectroscopy; magnetism of carbon materials; nitrogen-containing bio-carbon; pore size distribution; small-angle X-ray scattering.

2. Maksymych, V., Klapchuk, M., Borysiuk, A., Kulyk, Y., Stadnyk, V., Bordun, I., ... & Ivashchysyn, F. (2023). Hierarchical heterostructure built on the basis of SiO₂ dielectric matrix and supramolecular complex β-cyclodextrin-ferrocene: Fabrication, physical properties and applications. *Materials Research Bulletin*, 163, 112220.

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85149442048&origin=recordpage>

DOI: <https://www.doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112220>

ISSN: 00255408

Ключові слова: Coulomb blockade; Impedance spectroscopy; SiO₂ matrix; Spin EMF; Thermogalvanic effect.

3. Zhyhailo, M., Yevchuk, I., Ivashchyshyn, F., Demchyna, O., Chabecki, P., Babkina, N., Shantaliy, T. (2024). Modeling of Electrochemical Impedance of Fuel Cell Based on Novel Nanocomposite Membrane. *Energies*, 17(11), 2754.

URL <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85195846860&origin=recordpage>

DOI: <https://doi.org/10.3390/en17112754>

ISSN: 19961073

Ключові слова: composite membrane; fuel cell; impedance spectroscopy; Nyquist diagram; proton conductivity; SAXS.

– доктор хімічних наук, Халавка Юрій Богданович, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, доцент кафедри хімії та експертизи харчової продукції (за сумісництвом), проректор з наукової роботи.

1. Drapak S.I., Gavrylyuk S.V., Khalavka Y.B., Fotiy V.D., Fochuk P.M., Fediv O.I. Characterization of nanostructured In₆Se₇ inclusions in layered α-In₂Se₃ crystals using analytical X-ray diffractometry methods. *Ukrainian journal of physics*. 2022. 9. 671-683.

URL: https://www.scopus.com/pages/publications/85144497268?origin=results_list

DOI: <https://doi.org/10.15407/ujpe67.9.671>

Ключові слова: composites, analytical X-ray diffractometry methods, nanocrystallite inclusions, microstructure, layered In₂Se₃ crystals

2. Drapak S.I., Gavrylyuk S.V., Khalavka Y.B., Fotiy V.D., Fochuk P.M., Fediv O.I. X-ray diffraction characterization of nanostructured native oxide films on indium selenide by modified sherrer and williamson-hall methods. *Journal of Physical Studies*. 2022. 26(2). 2801-1- 2801-12

URL: https://www.scopus.com/pages/publications/85138563980?origin=results_list

DOI: <https://www.doi.10.30970/jps.26.2801>

Ключові слова: elastic properties; indium selenide; native oxide; thin films; X-ray diffraction analysis; X-ray phase analysis.

3. Nykyruy L., Andriichuk Y., Tynkevych O., Shyliuk O., Khalavka Y. Chemistry of nanomaterials in Ukraine: per aspera. *ChemistrySelect*. 2023. 8(46). e202303230

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85178942835?origin=resultlist>

DOI: <https://doi.org/10.1002/slct.202303230>

Ключові слова: Nanochemistry; Nanoparticles; nanostructures; overview; Ukraine.

4. Lukan Y., Hotynchan A., Andriichuk Y., Vojtovych S., Seti Y., Khalavka Y. II–VI Semiconductor-Based Nanomaterials. *Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors: Materials and Technology*. 2023. 325-357

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85207214816?origin=resultlist>

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-19531-0_12

Ключові слова: Catalysis; Closed heterostructures; Colloidal stability; Core-shell nanoparticles; Hollow nanostructures; Ion exchange; Nanobelts; Nanomaterials; Nanoparticles; Nanosheets; Nanowires; Open heterostructures; Photoelectrochemistry; Photosensors; PVD; Quantum dot; Selenide; Semiconductors; Solvothermal synthesis; Sulfides; Synthesis; Telluride; Zone diagram.

Голова фахового семінару
доктор фізико-математичних наук,
завідувач кафедри прикладної фізики
і матеріалознавства

Володимир КОЦЮБИНСЬКИЙ

Секретар фахового семінару
доктор фізико-математичних наук,
старший дослідник, професор
кафедри прикладної фізики
і матеріалознавства

Богдан РАЧІЙ

22 вересня 2025 р.