

**Відгук**  
офіційного опонента  
про дисертацію Хань Вея  
**“Формування вуглецевих та оксидних наноструктур  
для відновлювальної енергетики:  
моделювання та експериментальні дослідження”**,  
представлену до захисту на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук за спеціальністю  
01.04.18 – фізика і хімія поверхні

**Актуальність тематики**

Сьогодні прогрес у більшості галузей промисловості, включаючи енергетику та транспорт, неможливий без реалізації ефективних технологічних рішень в сфері розробки високопотужних, високоенергетичних, оборотних, мобільних накопичувачів електричної енергії. Проблема, поза сумнівом, носить комплексний, багатоплановий характер і найбільш реальні практичні її розв'язки знаходяться в площині розробки електрохімічних систем нового покоління. При цьому, на передній план виходить проблематика створення електродних матеріалів, фізико-хімічні властивості яких чітко адаптовані до ефективної роботи в електрохімічному пристрої накопичення чи перетворення енергії певного типу (літєві джерела струму, суперконденсатори, електрокаталізатори, фотоперетворювачі). Основна увага приділяється функціональним наноструктурованим матеріалам, застосування яких відкриває широкий спектр можливостей впливу розмірно-чутливих ефектів на їх електронні властивості, що може відіграти ключову роль в досягненні високої ефективності роботи електрохімічних пристроїв з електродами на їх основі. Інтенсивний ріст функціональних параметрів пристроїв накопичення енергії, зокрема збільшення числа циклів заряду / розряду, зростання питомої потужності та питомої енергії, вимагає глибокого розуміння фізичних і хімічних процесів, що супроводжують їх роботу та вимагає нових рішень, базованих на комплексному вивченню взаємовпливу всіх компонент електрохімічної системи. Ключові позиції зберігає встановлення взаємозв'язків між умовами отримання та морфологічними, структурними, електрохімічними властивостями наноструктурованих чи нанопористих електродних матеріалів, а також вдосконалення методів контролю і цілеспрямованої зміни їх характеристик для оптимізації роботи системи в цілому. Саме це і стало центральною об'єднуючою ідеєю аналізованої дисертаційної роботи.

Критичний аналіз публікацій за тематикою дозволяє зробити однозначний висновок, що найбільш активний науковий пошук перспективних електродних матеріалів для пристроїв перетворення та накопичення енергії, здійснюється сьогодні саме серед вуглецевих наноструктурованих систем (мікро- та мезопористий вуглець, графен, оксид графену та відновлений оксид графену), а також систем на основі ультрадисперсних оксидів (в першу чергу перехідних металів), причому значна увага приділяється композитам та гібридним матеріалам. В цьому розрізі, актуальність роботи Хань Вея, метою якої стало отримання вуглецевих та оксидних наноструктур і нанокомпозитних систем, з властивостями адаптованими для застосування в якості електродних матеріалів для суперконденсаторів, електрокаталізаторів, фотокаталізаторів з проведенням глибокого аналізу впливу умов синтезу на структурно-морфологічні, електрохімічні, електричні та оптичні властивості отриманих структур і композитів, не викликає жодного сумніву. Додатковими свідченнями здійснення автором науково-дослідницької діяльності на передньому краю розвитку сучасного прикладного матеріалознавства є її виконання в рамках цілого ряду наукових

програм, зокрема 13 грантів Національного фонду фундаментальних досліджень Китаю, 3 грантів Національної базової дослідницької програми Китаю, 2 грантів Національної китайської програми високотехнологічних досліджень, а також цілого ряду інших грантових програм.

Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатка. Повний обсяг дисертації становить 297 сторінок, з них: 15 таблиць та 147 рисунків, 487 літературних джерел на 49 сторінках та додаток на 4 сторінках. Отже, всі вимоги щодо структури роботи та її обсягу були дотримані. Об'єм першого розділу становить 9 відсотків від основного тексту дисертаційної роботи, першого та другого розділів – 13 %, тобто вимоги щодо співвідношення об'ємів тексту витримані.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання роботи, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів в рамках предмету досліджень – встановлення загальних закономірностей перебігу процесів формування наноструктурованих матеріалів на основі вуглецю, оксидів металів, споріднених сполук та композитів, а також їх електрофізичних та електрохімічних властивостей.

У **першому розділі** увага акцентується на окресленні основних задач та проблем відновлювальної енергетики. Значну частину огляду приділено опису сучасного стану, новітніх підходів та методик отримання наноструктурованих матеріалів для пристроїв генерації, накопичення та зберігання енергії. Здійснено розгорнутий аналіз літературних даних щодо впливу морфології та розмірів частинок вуглецевих та оксидних наноматеріалів на процеси накопичення заряду та перетворення енергії для електродних матеріалів різнопланового призначення, а також для оптичних, люмінесцентних, сенсорних та каталітичних систем. Акцент зроблено на аналізі матеріалів для електродів суперконденсаторів, фото- та електрокаталітичної генерації водню та електрокаталізаторів для очистки повітря.

**Другий розділ** дисертації присвячений огляду, навіть переліку використаних в експериментальній роботі реагентів та матеріалів, а також лабораторного обладнання. Коротко та емко описано основні застосовані фізико-хімічні та аналітичні методи дослідження, підходи, використані при аналізі результатів електрохімічних методів аналізу, а також розрахункові методи та прийоми, застосовані при моделюванні фізико-хімічних процесів.

У **третьому розділі** дисертаційного дослідження викладено та проаналізовано результати встановлення взаємозв'язків між структурою, морфологією та електропровідністю вуглецевих наноматеріалів в розрізі їх застосування в якості електродів суперконденсаторів та сенсорів. Відомо, що розробка ефективних електрохімічних конденсаторів, які працюють за принципом заряду / розряду подвійного електричного шару передбачає вирішення ряду проблем, зокрема збільшення питомої енергії, зростання часу саморозряду та зниження внутрішнього опору пристрою. Зокрема, оптимізація внутрішнього опору іоністора дозволяє окрім росту питомих енергетичних параметрів, забезпечити підвищення ККД пристрою, та безпеку його експлуатації на великих струмах заряду / розряду. Цінними як з загально-наукової, так і з практичної точок зору, є побудова та обґрунтування автором математичної моделі сорбції-десорбції вуглецевим електродом йонів електроліту, яка дозволила встановити залежність величини внутрішнього опору електрода в конкретному електроліті від його товщини. Важливо, що розроблена модель дозволяє пояснити нелінійний характер залежності внутрішнього опору електроду від його товщини, що передбачає можливість прогнозування параметрів суперконденсатора з оптимізацією його енергоємнісних характеристик. Іншим важливим результатом є розробка стратегічного підходу до підбору вихідної

сировини з метою отримання ефективних вуглецевих наноматеріалів з контрольованою пористою структурою. Зокрема, за умови використання технологічно доступної та низьковартісної природної сировини отримано доповане азотом пористе активоване вугілля, що поєднує високу питому площу поверхні (до  $1800 \text{ м}^2/\text{г}$ ) з трубчатою морфологією за умови високих ємнісних характеристик (до  $300 \text{ Ф/г}$ ) та відмінною кулонівською ефективністю (близько 100% при 10000 циклах заряду / розряду). Застосування ж синтетичної сировини на основі поліанілінів також дозволило досягнути принципово цікавих результатів, зокрема у випадку матеріалу, сформованого з наночастинок пластинчастої морфології досягнуто значення питомої ємності вище  $600 \text{ Ф/г}$ , причому встановлено залежність ємності від вихідного співвідношення компонент, що має пряме практичне застосування при впровадженні результатів дослідження у виробництво. Цікавим є і створення композитів на основі мезопористих поліанілінових структур та відновленого оксиду графену чи вуглецевих нанотрубок, що дозволило підвищити провідність електродного матеріалу та, відповідно, питомі енергетичні характеристики електрохімічного конденсатора (питома густина енергії  $25 \text{ Вт/год-кг}$ , питома потужність близько  $70 \text{ Вт / кг}$ ). Водночас складні композити на основі вуглецевих нанотрубок та поліаніліну апробовано в якості активного матеріалу для гнучких газових сенсорів етилового спирту, причому автором реалізовано конкретне інженерно-технічне рішення та створено спеціалізоване програмне забезпечення.

**Четвертий розділ** стосується проблематики отримання та тестування в якості електродів суперконденсаторів квазідвовірних графеноподібних карбідів та нітридів перехідних металів, а також їх композитів з відновленим оксидом графену, які завдяки високій електропровідності поєднаній з гідрофільністю поверхні розглядаються як перспективні електродні матеріали, які здатні забезпечити поєднання високих ємнісних характеристик з високою кулонівською ефективністю процесу заряду / розряду пристрою накопичення енергії. Цілеспрямована модифікація пластинчастих наночастинок  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  шляхом іммобілізації поверхневих функціональних груп ( $-\text{OH}$ ,  $-\text{O}$ ,  $-\text{F}$ ) дозволила отримати стабільні колоїди, які було нанесено на нікелеву піну з наступним вивченням електрохімічного відгуку електродів у водному розчині  $\text{KOH}$ . Оригінальне інженерно-фізичне рішення, запропоноване автором, для випадку симетричних конденсаторів комірки дозволило досягнути збереження питомої ємності на рівні 100% після 10000 циклів заряду / розряду. Цікавим з наукової точки зору результатом є створення композиту на основі відновленого оксиду графену та  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  в якому rGO відігравав подвійну роль зв'язуючого та електрохімічно-активного компоненту. Аналіз літературних даних свідчить про принципову новизну такого підходу, який веде до подальшого систематичного збільшення питомих ємнісно-енергетичних характеристик.

У **п'ятому розділі** увагу акцентовано на синтезі та апробації в гібридних конденсаторах наноструктурованих оксидів перехідних металів, що дозволило не тільки розширити вікно робочих напруг, але, поряд з ємністю подвійного електричного шару на поверхні вуглецевого електрода використати для накопичення енергії псевдоємнісний відгук, зумовлений швидкими поверхневими редокс-реакціями фарадеївської природи за участі йонів феруму, мангану, кобальту, нікелю. Автором запропоновано та реалізовано просту та ефективну схему отримання мезопористих шарів наночастинок  $\delta\text{-MnO}_2$ , безпосередньо нарощених на нікелевій піні, з можливістю контролю їх морфології при зміні температури та часу аналізу електрохімічної поведінки таких систем у водних кислих електролітах. Показано, що саме морфологія матеріалів визначає величину питомої ємності (до



325 Ф/г при густині струму 1 А/г) та високу циклювальну здатність (втрата ємності до 15% після 1000 циклів заряду / розряду при швидкості сканування 30 мВ/с.

Також, значна увага автором приділяється проблематиці створення композитів на основі нанодисперсних оксидів перехідних металів із провідними та високоемнісними матеріалами. Зокрема, створення та всестороннє вивчення властивостей гібридних структур на основі поліанілін, ацетиленової сажі та нанотрубок  $\text{MnO}_2$  дозволило мінімізувати ефекти спаду ємності при багатократних процесах заряду / розряду. Автором переконливо показано, що електроди на основі гібридних нанокомпозитів володіють відносно вищою кулонівською ефективністю, порівняно з матеріалами на основі тільки поліаніліну. Зокрема, присутність 5,0 мас.% ацетиленової сажі дозволяє досягнути питомої ємності 520 Ф/г при густині струму 1 А/г, тоді як застосування тільки PANI при тих же значеннях струму дозволяє досягнути 271 Ф/г. Автором побудована феноменологічна модель, яка пояснює спостережувані факти морфологічними особливостями матеріалу та формуванням каналів провідності, що дозволяють різко підвищити ефективність електронного транспорту в процесі заряду / розряду. Застосування мезопористих композитів  $\text{CoO}/\text{Co}_3\text{O}_4$  в класичній компоновці електродного матеріалу дозволило досягнути величини питомої ємності 451 Ф/г при густині струму 1 А/г, що значно вище у порівнянні з характеристиками електродів на основі чистого  $\text{CoO}$  (203 Ф/г).

**Шостий розділ** присвячений аналізу взаємозв'язку структурних та електрохімічних властивостей наноструктурованих (нанодроти та нанолісти)  $\text{Ni-Co}$ -фосфідів з їх електрокаталітичною активністю в реакціях дисоціації води, причому автором розроблено шляхи активного впливу на морфологію частинок (1D нанодроти чи 2D нанолісти) умовами синтезу, зокрема, варіювання концентрації карбаміду та  $\text{NH}_4\text{F}$  у розчині. Автором не тільки досягнуто високої каталітичної активності реакцій виділення кисню (ORE) та водню (HER), але й здійснено їх повну інтерпретацію та встановлення ключових факторів впливу, зокрема форми та густини розміщення нанодротів на поверхні NF, при яких досягається максимальна ефективність електронного транспорту з фіксацією синергетичного впливу нікелю і кобальту у каталізаторі та виникнення «вторинних» метал-фосфатних каталітичних зон на поверхні  $\text{NiCoP}$ . Вдосконалення принципів інтерфейс-інженерії при створенні фотоанодів на основі гетероструктур  $\text{BiVO}_4/\text{Fe}(\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x \text{ і } \text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)$ - шаруваті подвійні гідроксиди дозволило досягнути значного зниження перенапруги реакції виділення кисню та підвищити її ефективність. Увага автора була звернута на проблематику пошуку ефективних каталізаторів відновлення чи окиснення нітрозних газів та оксиду карбону на основі мезопористих шпінелей  $\text{Ce}_x\text{Co}_{1-x}\text{Cr}_2\text{O}_4$ , а також гетерогенних систем  $\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ , причому було встановлено не тільки оптимальні для каталітичної активності склади та робочі температури, але й здійснено фізико-хімічний аналіз процесів. Зокрема, з'ясовано вплив мікронапруг структури шпінелі, що виникають внаслідок збільшення концентрації кисневих вакансій, на окисно-відновну активність каталізатора.

**Сьомий розділ** роботи присвячено аналізу експериментально-теоретичних досліджень оптичних, люмінесцентних та напівпровідникових властивостей наноматеріалів, зокрема складних оксидів перехідних металів, легованих іонами рідкісноземельних елементів з позицій потенціалу їх застосування в пристроях накопичення чи перетворення енергії. Зокрема, для випадку  $\text{NaY}(\text{MoO}_4)_2$ , легованих іонами  $\text{Yb}^{3+}$  автором встановлено значення концентрації компонент при яких спостерігається максимальна інтегральна інтенсивність люмінесценції. Важливою частиною роботи є розробка сучасних люмінофорів на основі оксидів рідкісноземельних металів  $\text{Ln}_2\text{O}_3$  та  $\text{Y}_2\text{O}_3$  з встановленням залежності енергії основного стану екситонів від радіуса

частки з використанням варіаційного методу. Проведені розрахунки поглиблюють розуміння блакитного зсуву поглинання для оксидних наночастинок, причому запропонована модель може бути застосована для розрахунку енергії екситонів для інших типів наночастинок ядро-оболонка. Окрім того, отримано результати в рамках розробки гібридних сонячних елементів на основі наноконпозицій халькогеніди кадмію / органічні полімери. Отримані дані щодо кінетики переносу заряду в гібридних сонячних елементах на основі полі(р-феніленвінеліну) та нанокристалів CdTe дозволяють суттєво розширити розуміння фотоелектрофізичних процесів на межі розділу електрод/водний електроліт.

### **Достовірність та ступінь обґрунтування наукових положень**

Аналіз отриманих експериментальних результатів дисертаційної роботи Хань Вея свідчить про високий рівень планування та реалізації експериментальних та теоретичних досліджень, який дав змогу попри широкий спектр охоплених дисертаційним дослідженням наукових питань викристалізувати спільну "червону нитку", яка проходячи через всю роботу об'єднує її під єдиним "знаменником" – цілісний аналіз та встановлення взаємозв'язків між складом, морфологією та електрохімічними (електро- чи фотокаталітичними), напівпровідниковими і оптичними властивостями отриманих структур і композитів як активних функціональних матеріалів для пристроїв накопичення та перетворення енергії. Таким чином, основне враження від роботи – багатокомпонентність яка не є недоліком, а навпаки, перевагою, і дозволяє сформулювати цілісну та послідовну фізичну картину процесів, що відбуваються на межі розділу електрод / електроліт. Перекоаний, що робота є завершеним дослідженням як з точки зору постановки експериментальних завдань, так і з позицій підбору використаних для інтерпретації теоретичних моделей. Важливо, що всі експериментальні дані піддавались математичній обробці з застосуванням адекватних прийомів та моделей. Достовірність отриманих результатів забезпечується застосуванням цілого ряду взаємодоповнюючих та взаємоконтролюючих методів, зокрема скануючої та трансмісійної електронної мікроскопії, рентгенодифрактометрії, низки спектроскопічних методів (рентгенівська фотоелектронна, раман, оптична спектроскопія), повного спектру електрохімічних методів (циклічна вольт-амперометрія, гальваностатичне циклювання, спектроскопія електрохімічного імпедансу, хронопотенціометрія), низькотемпературна адсорбція азоту. Все це дозволило отримати чисельні характеристики об'єктів та явищ з високою точністю, зокрема оптимізована товщина вуглецевого електрода суперконденсатора, яка відповідає мінімуму внутрішнього опору встановлено з точністю до 0,05-0,10 мкм, тоді як зображення відшарованих нанопластівців  $d\text{-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  отримані методом високороздільної трансмісійної електронної мікроскопії дозволили спостерігати особливості структурного впорядкування на атомному рівні. Інтерпретація експериментальних результатів відбувалася комплексно, з залученням загальновизнаних та самостійно створених моделей. З огляду на сказане вище, можна зробити висновок, що представлені у дисертаційній роботі результати є достовірними.

Основні результати в роботі викладені автором в 24 статтях, презентувалися на 6 міжнародних конференціях тому пройшли необхідну апробацію. Особливу увагу хочеться звернути на якість наукових публікацій, які в абсолютній більшості відносяться до першого та другого квартилю за рейтингом Scimago.

Підсумовуючи, вважаю, що основні результати та висновки дисертаційної роботи Хань Вея є науково-обґрунтованими.

**Наукова новизна**

Опираючись на аналіз усіх розділів дисертації Хань Вея можна стверджувати, що вона містить як окремі, так і загальні наукові положення і здобутки, що дозволили автору прийти до ряду важливих та вагомих висновків. Зокрема, необхідно ще раз відзначити, що автором дисертаційної роботи реалізовано комплексне експериментальне дослідження в рамках проблематики науково-обґрунтованого контролю властивостей функціональних наноматеріалів (вуглецевих, оксидних та гібридних й композитних) з метою оптимізації функціонування електродних матеріалів пристроїв накопичення та перетворення енергії різного принципу дії (симетричні та асиметричні суперконденсатори, електрокаталізатори, фотогальванічні перетворювачі). При цьому, автором запропоновано та апробовано ряд принципово нових підходів до синтезу наноструктурованих матеріалів та проаналізовано вплив умов синтезу, морфології та структурних параметрів на електрофізичні та електрохімічні властивості отриманих матеріалів. Одержані результати є важливим вкладом в розбудову стратегії розробки електродних матеріалів нового покоління, з можливістю, зокрема, прогнозування параметрів суперконденсаторів високої питомої ємності, виходячи з особливостей морфології та характеристик електроду. Вперше було запропоновано теоретичну модель, яка описує нелінійну залежність між товщиною вуглецевого шару електроду суперконденсатора та його внутрішнім опором. Важливим результатом є встановлення перспектив застосування мезопористих поліанілінів в якості основи наноструктурованих електродних матеріалів для гнучких суперконденсаторів високої ємності. Встановлено можливість підвищення каталітичної активності електрокаталізаторів генерації виділення кисню та водню через застосування наноструктурованих, зокрема квазідвомірних матеріалів. Безсумнівно цінність представляє розробка нової стратегії формування фотоанодів для дисоціації води на основі тривимірних гетероструктур  $\text{BiVO}_4$  та електрокаталізаторів на базі змішаних оксидів/гідроксидів 3d-перехідних металів. Автором зроблено цілісні висновки щодо збільшення активності та стійкості до деградації каталізаторів при застосуванні наноструктурованих систем різного складу. Показано безпосередній вплив розмірних ефектів на оптичні та люмінесцентні характеристики гібридних напівпровідникових систем та окреслено можливості збільшення ефективності їх функціонування.

### **Практична цінність**

Отримані в процесі виконання дисертації результати, мають незаперечну наукову, технологічну та методичну цінність. Зокрема, автором отримано значний масив інформації про взаємозв'язок структури, морфології поверхні, електрофізичних властивостей наноматеріалів різного типу, а розроблені ним оригінальні підходи та стратегії щодо отримання контролю властивостей наноструктурованих матеріалів можуть знайти широке застосування при вдосконаленні суперконденсаторів із високою питомою потужністю, створення гнучких суперконденсаторів та газових сенсорів, високоефективних електро- та фотокаталізаторів розкладу води. Кількісний, а насамперед якісний рівень результатів, чітка орієнтація досліджень на практичне впровадження їх результатів, широка грантова підтримка, яка надається лише за умови не потенційно-застосовуваних, а для розробки конкретних науково-технічних рішень – все це є свідченнями наукової цінної та значимості роботи здобувача.

### **Запитання та зауваження**

Поряд з великою кількістю цікавих результатів, отриманих дисертантом, після уважного вивчення роботи виникає ряд запитань, зокрема:



1. Бажано було б отримати ширшу інформацію про умови отримання оксиду графену, який на наступному етапі відновлювався гідротермальним методом з наступною сублімаційною сушкою та формуванням аерогелю відновленого оксиду графену. Застосування певного методу (зокрема класичного методу Хамерса чи однієї з його варіацій) визначатимуть структурну однорідність, морфологічні особливості та, що особливо важливо, електрофізичні характеристики матеріалу (зокрема питому провідність), що накладає відбиток на властивості композитних систем на основі rGO. Таким чином, чи здійснювалися додаткові дослідження провідності застосованого в експериментах rGO і на основі яких даних вибиралися умови відновлення колоїду оксиду графену?
2. Для випадку отримання пористого активованого вугілля з природної сировини не до кінця є мотивованим вибір температури карбонізації-піролізу ( $750^{\circ}\text{C}$ ), що є вищою за типові значення температури деструкції хеміцелюлози та нижчою в порівнянні з температурою розкладу лігніну. Окрім того, електропровідність активованого вугілля залежить від ступеня графітизації, яку можна встановити, зокрема, методом раманівської спектроскопії. Водночас, ріст графітизації передбачає зниження величини питомої площі поверхні. Чи було зроблено виходячи з цих міркувань, оцінки оптимальних значень температур карбонізації та активації?
3. На кривих циклічної вольт-амперометрії, отриманих для випадку електродів на основі системи 3D-rGO/PANI спостерігається редокс-відгук, зумовлений поверхневими реакціями за участі кисневмісних груп на поверхні частинок графенової компоненти. Чи не представляється можливим оцінка відносного вкладу псевдоємнісної компоненти в загальну ємність матеріалу?
4. На вольтамперометричних кривих, отриманих для випадку гібридних матеріалів  $\text{MnO}_2\text{-Ni(OH)}_2$ , зокрема Mn-NF/AB та MN-NF, чітко спостерігаються пари редокс-піків, що відповідають окисно-відновному процесу  $\text{Ni}^{2+} \leftrightarrow \text{Ni}^{3+}$ , причому чітко спостерігається асиметрія анодної та катодної віток. Суттєвим доповненням до опису цих процесів могли б стати розрахунки значень коефіцієнтів дифузії електроактивних частинок за даними ЦВА аналізу. Цікаво було б також здійснити порівняльний аналіз значень величин питомої ємності, розрахованих для електродів на основі цих матеріалів, отриманих методами циклічної вольт-амперометрії та гальваностатичного циклювання.
5. Цікавим та важливим результатом роботи є встановлення факту підвищення електрохімічної активності наноструктурованого композиту  $\text{CoO/Co}_3\text{O}_4$  в порівнянні з наносферами CoO. Було б цікаво почути більш розгорнуту інтерпретацію синергетичного впливу компонент композиту з точки зору встановлення причин зростання швидкості фарадеївських процесів окислення-відновлення  $\text{Co}^{2+} \leftrightarrow \text{Co}^{3+}$  та  $\text{Co}^{3+} \leftrightarrow \text{Co}^{4+}$ .
6. В дисертації зустрічаються слова, терміни чи скорочення, прямо запозичені з російської чи англійської мов, проте, зважаючи на виключно англомовне *portfolio*, це не є суттєвим моментом. Текст дисертації також дещо переобтяжений аббревіатурами, що дещо ускладнює сприйняття матеріалу.

Вказані вище зауваження мають рекомендаційний характер і не стосуються висновків та наукових положень, що формують наукову новизну отриманих результатів, ніяким чином не зменшуючи їх наукову та практичну цінність.

## Висновок

Оцінюючи дисертаційну роботу Хань Вея в цілому, слід підкреслити, що вона є широкоплановою, завершеною, ґрунтовною експериментальною науковою працею, в якій з необхідною повнотою викладено всі етапи отримання наукових результатів – від критичного аналізу літературних джерел та прискіпливого опису методів і процедур виконання експерименту, до детального аналізу усієї сукупності отриманих експериментальних характеристик досліджуваних явищ та побудови несуперечливих моделей перебігу фізико-хімічних процесів. Текст автореферату узгоджений з текстом дисертації, чітко відображаючи її основні наукові результати та положення.

Дисертаційна робота Хань Вея на тему **«Формування вуглецевих та оксидних наноструктур для відновлювальної енергетики: моделювання та експериментальні дослідження»** повністю відповідає вимогам МОН України до дисертаційних робіт (пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., зі змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р. та №567 від 27.07.2016 р.), а її автор, – Хань Вей, заслуговує на присвоєння йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.18 – «Фізика і хімія поверхні».

Офіційний опонент:

професор кафедри матеріалознавства і новітніх технологій  
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет  
імені Василя Стефаника»,

доктор фізико-математичних наук, професор



В.О. Коцюбинський

