

ВІДЗИВ

офіційного опонента про дисертацію Бойчук Володимири Михайлівни «Синтез, структурно-морфологічні та електрохімічні властивості наносистем на основі сполук Ni та Mo і вуглецевих матеріалів», яку подано на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.18 – фізика і хімія поверхні

Дана дисертація стосується проблематики одержання композитних матеріалів на основі карбонових наноструктур (так званого «відновленого оксиду графену», мікро- та мезопоруватих вуглецевих матеріалів) та ультрадисперсних сполук нікелю та молібдену (гідроксиду нікелю, дісульфіду й діоксиду молібдену, ультрадисперсної нікель-залізної шпінелі) з аналізом впливу їхніх морфологічних та електрофізичних властивостей на ефективність застосування цих матеріалів як основи електродної композиції електрохімічних конденсаторів на (а)протонних електролітах.

Зазначимо, що одержання наноструктурованих композитів «кристалохемічні сполуки 3d-перехідних металів/карбонові матеріали» з наперед заданими фізико-хімічними властивостями є комплексним завданням, що передбачає відпрацювання науково-обґрунтованих процедур синтезу ультрадисперсних гетерофазних систем за умови контролю структурних і морфологічних характеристик. Та важливим є й наступний крок — пристосування властивостей одержуваних матеріалів до роботи функціональним середовищем у конкретному технологічному використанні. Адже наявність аспекту розв'язання конкретної прикладної задачі за умови проходження всіх науково-дослідних стадій технологічного циклу, — від проектування властивостей матеріалу до встановлення ефективності його роботи в умовах, близьких до експлуатаційних, — є однією з основних вимог до конкурентоспроможної й актуальної діяльності в галузі фізичного матеріалознавства. На прикладі ключових завдань роботи, встановлених для напряму «Наноматеріали, нанотехнології та передові промислові виробництва» глобальної програми підтримки науки й інноваційної діяльності Європейської Комісії «Горизонт 2020», відомо, що максимальною потребою для високотехнологічного суспільства нині є нові варіанти ефективнішого накопичення електричної енергії. Підставою для цього є нагальна потреба у простих і низьковартісних технологічних рішеннях в галузі накопичення енергії від періодично діючих відновлюваних джерел (сонячної, вітрової), а також проблема створення джерел електроструму з підвищеними потужнісними характеристиками для потреб електротранспорту. Серед перспективних напрямів, яких буде впроваджено у виробництво та комерціалізовано в найближчому майбутньому, в цій галузі можна однозначно виділити розробку електрохімічних конденсаторних систем, перевагою яких, порівняно з літій-йонними джерелами, є можливість значного збільшення струмів зарядження–розрядження. Водночас, для цілого ряду практичних застосувань необхідною умовою є реалізація гібридної схеми — швидке навантаження та відносно повільне розрядження. Цим вимогам задовольняють гібридні конденсатори, які поєднують два механізми накопичення заряду — електростатичний, характерний для високопотужних конденсаторів подвійного електричного шару, та фарадеївський, який передбачає перебіг Фарадейових окиснювально-відновних реакцій на поверхні та в об'ємі електродного матеріалу.

Зрозуміло, що підвищення експлуатаційних характеристик таких систем, зокрема питомої ємності, потужності й енергії, припускає розробку нових ефективних електродних систем. Незважаючи на численні експериментальні роботи в цій галузі, єдиної стратегії одержання електродного матеріалу з оптимальними параметрами до сих пір не було розроблено. Основною проблемою тут стає на заваді необхідність забезпечення рівнів, в ряді випадків взаємовиключних, двох характеристик — високих значень величини питомої площі поверхні, що уможлиблює досягнути значної ємності подвійного електричного шару на роздільчій межі електроліту з електродою, та високої електричної провідності, яка уможлиблює пришвидшити процеси електронного обміну при фарадеївському перенесенні заряду в системі. Нині на думку більшості дослідників, оптимальним варіантом розв'язку цієї проблеми є застосування

композитних електродних матеріалів, де редокс-активна складова працює в парі із складовою, яка, проявляючи електронну провідність, має добрі поляризаційні властивості в поєднанні з розвиненою поверхнею. Як правило, в якості першої складової тестуються оксиди чи то сульфідні перехідних металів, в той час як другою складовою виступають карбонові (нано)структури. Та, незважаючи на значний поступ в розробці таких композитних систем, досі були відсутні результати комплексного вивчення впливу умов синтезу на їхні електропровідні й електрохімічні властивості за умови збереження та контролю морфології і структурних характеристик складових. Іншим важливим аспектом є вибір електроліту. Застосування аprotонних розчинників уможливило збільшити ширину потенціального вікна, в якому відбувається циклування електроди, та підвищити таким чином величину питомої енергії. Водночас, застосування таких систем накладає жорсткі технологічні й екологічні обмеження на складання, роботу й утилізацію пристроїв накопичення заряду. Перевагами протонного електроліту є технологічна простота та низька вартість компонування пристрою, а звуження потенціального вікна можна компенсувати підвищенням величини питомої ємності. Науковий пошук в цьому випадку передбачає оптимізацію властивостей багатокомпонентної системи як цілого.

Націлена на вирішення в ідейному плані зазначених питань дисертаційна робота пані В. М. Бойчук має виразну експериментальну та прикладну скерованість, оскільки основною метою цього дисертаційного дослідження стало саме встановлення загальних зв'язків між умовами синтезу, структурою та механізмами електропровідності, а також електрохімічними властивостями композитних систем на основі нанодисперсних сполук нікелю та молібдену (в тому числі гідроксиду нікелю, діоксиду та дісульфіду молібдену, залізо-нікелевої шпінелі) та карбонових наноматеріалів (зокрема так званого «відновленого оксиду графену» та поруватих аморфних вуглецевих матеріалів). Для всіх цих систем було проаналізовано особливості перебігу електрохімічних процесів у модельних електрохімічних конденсаторах з електродами на основі цих матеріалів. Враховуючи зазначене, виконану дисертаційну роботу можна визнати *актуальною* з точки зору поставленої науково-практичної мети та застосованого для досягнення неї комплексного експериментального підходу. Додатковим показником її актуальності можна вважати виконання дисертанткою роботи в рамках держбюджетних науководослідних тем фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника».

Та актуальну спрямованість тематики дисертаційної роботи зумовлено й її завданнями, серед яких можна виділити з'ясування впливу структурно-морфологічних (розподіл пор за розмірами, величина питомої площі поверхні) й електрофізичних (питома провідність, величини потенціалу пласких зон, концентрація носіїв) властивостей на питому ємність електрод електрохімічних конденсаторів із виявленням домінуючих механізмів накопичення заряду, аналізом механізмів формування зародків шпінелевої фази при рідкофазній синтезі у водному середовищі, аналізом впливу масового співвідношення складових композитів на їхні електрофізичні й електрохімічні властивості; розв'язання цих завдань, окрім практичного навантаження їх, потребує дослідження з фізики та хімії процесів на поверхні твердого тіла.

Як заслугу дисертантки можна відзначити реалізацію цілісної порівняльної аналізи взаємозв'язків між умовами одержання та структурно-морфологічними й електрофізичними властивостями композитних систем на основі карбонових (нано)матеріалів (так званого «відновленого оксиду графену», мікро- та мезопоруватого вуглецю) чи то гідроксидів нікелю, дісульфідів та діоксидів молібдену, ультрадисперсної нікель-залізної шпінелі, а також енергоємними параметрами електрод електрохімічних конденсаторів на основі цих матеріалів із застосуванням водно-лужного електроліту. Так, встановлено співвідношення внесків електростатичної та фарадеївської компонент ємності електрод на основі легованого Нітрогеном поруватого вуглецю, а також композитних систем гідроксиду нікелю з так званим «відновленим оксидом графену»; також проведено вивчення особливостей структури, морфології, електропровідності так званого «відновленого оксиду графену», одержаного різними методами.

Дисертація пані В. М. Бойчук має достатній ступінь опрацьованості структурних елементів, повноти, поглибленості та конкретності; вона містить елементи *новизни*. Так, було

розв'язано ряд наступних нових і цікавих (на мою думку) експериментальних і теоретичних задач, поставлених перед даною роботою.

1. Було з'ясовано умови одержання поруватих вуглецевих матеріалів із застосуванням кислотної та лужної активації і виявлено основні закономірності впливу умов активаційного оброблення вуглецевого матеріалу на його морфологію та на ємнісні характеристики електрохімічних конденсаторів. А для випадку вуглецевих матеріалів, допованих Нітрогеном, вперше було виділено внески ємності подвійного електричного шару та псевдоємності. Аналогічну процедуру було реалізовано для електрод на основі композитних систем «гідроксид ніклю/так званий «відновлений оксид графену»».
2. Було охарактеризовано зв'язок морфології та електропровідності й електрохімічної активності композитів на основі нанорозмірних діоксиду молібдену чи то дісульфіду молібдену і так званого «відновленого оксиду графену», яких було одержано гідротермальною методою за умови наявності колоїдного розчину так званого «оксиду графену» чи то мікропоруватого вуглецю в реакційному середовищі ще на етапі синтезу, що уможливило реалізувати одержання тих композитів з гомогенізацією компонент на наномасштабному рівні.
3. Було експериментально вивчено й описано вплив типу комплексоутворювача, в якості якого було використано гліцин, лимонну кислоту чи то сечовину, на перебіг зародкоутворення та морфологічні характеристики залізо-ніклевих шпінелей, а також композитних систем «ферит ніклю/так званий «відновлений оксид графену»» при одержанні їх методою золь-гель-самозаймання з вивченням впливу розміру частинок матеріалу на ефективність його роботи в гібридних електрохімічних системах накопичення заряду.
4. Було встановлено умови гідротермального одержання композитів «MoS₂/вуглець» із графеноподібною квазидвовимірною морфологією частинок, в яких шари сульфіду молібдену атомової товщини розділені шарами аморфного вуглецевого матеріалу. Аналогічною методою було одержано й описано властивості композитних систем «гідроксид ніклю/так званий «відновлений оксид графену»».
5. Для ряду сполук ніклю та молібдену з'ясовано вплив структурно-морфологічних (розподіл пор за розмірами, величина питомої площі поверхні) та електрофізичних (питома провідність, величина потенціалу пласких зон, концентрація носіїв) характеристик на питому ємність електрод гібридних електрохімічних конденсаторів з виявленням домінуючих механізмів накопичення заряду.

Що стосується структури дисертації, то вона складається зі вступу, сімох розділів, загальних висновків і списку використаних літературних джерел.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», визначено об'єкт, мету, завдання та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення результатів роботи, особистий внесок авторки в працях, опублікованих у співавторстві, охарактеризовано вірогідність, зазначено апробацію та впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Стосовно *Вступу* є одне зауваження. При формулюванні наукової новизни одержаних результатів, крім простого переліку виконаних завдань досліджень, варто було б у вигляді конкретних наукових положень, яких винесено на захист, висвітити фізичну суть результатів у термінах закономірностей розглянутих процесів, явищ і моделей. Власне нові наукові результати даної дисертаційної роботи значно повніше відображено в розділі «Основні результати та висновки» наприкінці дисертації.

У невеличкому оглядовому *першому розділі* на підґрунті використаної літератури проаналізовано та систематизовано дані про фізичні основи роботи електрохімічних конденсаторів, зазначено вимоги до сучасних електродних матеріалів на основі наномасштабних структур і матеріалів (в першу чергу з двокомпонентних систем). Таким структурам і матеріалам на їх основі присвячено широкий ряд експериментальних і теоретичних досліджень, проте залишається низка питань, відповіді на які мають додати розуміння особливостей формування ультрадисперсних систем з потрібною структурою, з контролем механізмів перенесення та

накопичення заряду. Центральне місце тут займає розгляд електрохімічних властивостей нанорозмірних карбонових систем і сполук перехідних металів, а також особливостей використання їх як електродних матеріалів.

Щодо першого розділу є два непринципових зауваження. 1) На жаль, хоча в оглядовій частині значну увагу й приділено саме проблематиці опису електричних властивостей електрохімічних систем, вже відомі вимоги до параметрів наноструктурованих композитів заради досягнення максимальних значень питомих енергії та ємності відображено й узагальнено фрагментарно. **2)** Є певні недогляди редагувального характеру; так, в цьому розділі (та й Вступі і наступних розділах дисертації) зустрічаються дрібні граматичні помилки, застосовано не найкращу українськомовну фізичну термінологію та жаргонові словосполучення, наприклад, «зв'язуючий агент», а не «зв'язувальний (чи то) сполучний агент» (як то мало би бути за фізичним лексиконом, що дотримується питоменного українського назовництва і так званого «харківського» українського правопису), чомусь «циклювання» замість «циклування», «границя розділу», а не «роздільча межа», місцями «окислення» замість «окиснення», «окислювальна реакція» замість «окиснювальна (чи то оксидаційна) реакція», «впроваджений іон», а не «втілений (або прониклий) йон», «ультразвукова обробка» замість «ультразвукове оброблення», «скануючий мікроскоп», а не «сканівний (або сканувальний) мікроскоп», «високороздільний просвічуючий мікроскоп» замість «високорозріжняльний просвіт(люваль)ний мікроскоп», чомусь «зона Брільюена», а не «Бріллюенова зона», «рівняння Мотта–Шоткі» замість «рівняння Мотта–Шотткі», «нержавіюча сталь», а не «не(і)ржавійна криця (чи то сталь)», «розсіюючі центри» замість «розсіювальні центри» тощо.

У цікавому та змістовному *2-му розділі* проаналізовано вплив умов синтезу (карбонізації й активації) на структурно-морфологічні характеристики поруватих вуглецевих матеріалів. З'ясовано оптимальні режими активаційного оброблення (температура, тип агента-активатора, кількість процедур активації, додаткове легування й оброблення ультразвуком) для досягнення заданого комплексу структурно-морфологічних і електрохімічних властивостей поруватих вуглецевих систем, співвідношення внесків електростатичної та фарадеївської складових ємності електрод на основі поруватого вуглецю, легованого Нітрогеном.

До другого розділу є три непринципових зауваження. По-перше, важливим результатом роботи є встановлення можливостей підвищення електрохімічної активності (нано)поруватого вуглецевого композиту; та було б корисно довідатися про більш розлогу (з точки зору дисертантки як сформованої спеціалістки найвищої кваліфікації) інтерпретацію синергізму впливу складових композиції та, зокрема, про причини зростання швидкості Фарадеєвих окиснювально-відновних процесів. **По-друге**, у такого роду роботі, на мій погляд, було б доцільно детальніше вивчити, наприклад, дослідження залежності диференційної ємності від величини постійної напруги, властивості подвійного електричного шару електрохімічного конденсатора (бо, як відомо, такі дослідження у випадку напівпровідникових структур дають уявлення про тип шару, напруженість електричного поля у ньому, ширину області просторового заряду). **По-третьє**, на сторінках 51, 59, 66, 68 цього розділу (та й на сторінках 106, 125 і 267, відповідно, третього, четвертого й сьомого розділів) зазначено, що розрахунок розподілу нанопор за розмірами для синтезованих поруватих матеріалів без та з карбоновмісною складовою було здійснено за допомогою теорії функціоналу електронної густини, зокрема на основі аналізу експериментальних ізотерм адсорбції–десорбції, але зрозумілого (й повчального!) опису саме такої (поєднувальної) методики, параметрів використаних у ній моделей і меж застосовності їх тут не наведено.

Третій розділ дисертації містить порівняльний опис структурних та електрофізичних властивостей так званих «оксидів графену» (rGO), синтезованих за різними методами (за Хамерсом і Маркано–Туором). Виявлені відмінності в енергіях активації провідності для цих матеріалів пояснено різницею в ступенях структурного впорядкування. Зокрема, вища структурна однорідність так званого «відновленого оксиду графену», синтезованого за протоколом Маркано–Туора, сприяє міграції носіїв заряду між фрагментами графіту, які утворюють мезопорувату сітку, що передбачає відносно нижчі енергії активації електропровідності, в той час

як стрибкувата міграція між окремими частинками у матеріалі, одержаному за Хамерсовим протоколом, зумовлює вищі значення енергії активації перенесення заряду.

Стосовно третього розділу є два зауваження-побажання. **1)** Не варто казати тут (та й у інших розділах дисертації) про «оксид графену», бо графен — це кристал, і тому це так само як казати «оксид графіту», «оксид алмазу (чи то діаманту)». Коли ж кажуть про оксид, то певно мають на думці молекулу хемічної сполуки (хай навіть багаторазово повторену у вигляді періодичного кристалу). В даному ж випадку можна казати тільки, що на поверхні графенового шару деінде адсорбовані молекули чи атоми Оксигену або такі-то окисні (чи про втілені у графеновий шар атоми Оксигену). **2)** Ймовірною причиною відмінностей у властивостях між зразками так званого «відновленого оксиду графену», синтезованого різними способами, припускається зміна кількості епоксидних груп, розташованих на краях графенових площин; та прямих доказів цього (хоча б засобами мікроскопії) тут не наведено.

Найбільший *четвертий розділ* містить результати дослідження впливу умов сумісної гідротермальної синтези на властивості ультрадисперсного діоксиду MoO_2 та композитних матеріалів « MoO_2 /вуглець» і « MoO_2 /так званий «відновлений оксид графену»». Тут показано, що графенові фрагменти беруть участь у зародкотворенні діоксиду молібдену, впливаючи на його морфологію, а частинки вуглецю формують оболонки навколо частинок оксидної фази. З'ясовано, що, якщо в морфології MoO_2 домінують мезопори, то для композитів MoO_2 /rGO та « MoO_2 /вуглець» можна виділити внесок карбонової складової, яка характеризується наявністю як мікро-, так і мезопор, за умови звуження діапазону розподілу пор для оксидної складової в результаті заповнення міжчастинкових пор фрагментами rGO та вуглецевого матеріалу. Якщо для MoO_2 передбачається перколяційний тип провідності, то для композитів виділено й описано як низькочастотну складову провідність по міжзеренних межах і перенесення електронів у об'ємі кристалітів з близькими енергіями активації. Показано, що з підвищенням частоти провідність графенової складової знижується, а оксидної — зростає, що уможливило розділити їхні внески. Авторкою розроблено певний модель перенесення заряду у композиті MoO_2 /rGO, що описує цей матеріал як систему тривимірних сіток, сформованих наночастинками MoO_2 та rGO. У композиті « MoO_2 /вуглець» транспорт носіїв струму при температурах $\leq 75^\circ\text{C}$ відбувається по каналах, сформованих вуглецевими частинками, тоді як підвищення температури веде до уможливлення міграції електронів між частинками MoO_2 та мікропоруватого вуглецю. Показано, що різке збільшення коефіцієнта дифузії у MoO_2 /rGO в порівнянні з MoO_2 уможливило досягнути високих значень величини питомої ємності — аж до 395 Ф/г. А для композитів « MoO_2 /вуглець» максимальне значення її складає майже 225 Ф/г. Продемонстровано, що застосування різного типу поверхнево-активних речовин уможливило одержати нанорозмірні композити на основі MoS_2 та вуглецю із можливістю контролю їхньої морфології, причому в цих системах квазидвовимірні фрагменти дісульфіду молібдену розділені шарами аморфного вуглецевого матеріалу. Одержані матеріали було успішно апробовано в електрохімічних конденсаторах у водному електроліті з досягненням питомої ємності до 200 Ф/г.

До четвертого розділу (та й наступного, 5-го) є два непринципових зауваження. **По-перше**, на мій погляд, було б доречно пояснити причини відмінності у значеннях питомої ємності, виявлених методами циклічної вольтамперометрії та гальваностатичного циклування. **По-друге**, корисним було б і роз'яснення впливу фрагментів так званого «оксиду графену» на морфологію дісульфіду чи то діоксиду молібдену при гідротермальній синтезі.

П'ятий розділ дисертації стосується апробації можливостей використання як електродного матеріалу композиту на основі гідротермально синтезованого гідроксиду ніклю та так званого «відновленого оксиду графену». Для цього матеріалу за низьких швидкостей сканування потенціалу було досягнуто значення питомої ємності аж до 510 Ф/г, причому було встановлено, що зростання вмісту графенової складової приводить до збільшення дисперсності матеріалу з одночасним збільшенням міжплощинної віддалі в структурі $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

Стосовно п'ятого розділу є непринципове зауваження-побажання. Корисним було б витлумачення дисертанткою фізичних механізмів виявлених нею же синергічних ефектів взаємочину так званого «відновленого оксиду графену» та β -форми гідроксиду ніклю $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$,

власне результатом чого є значне зростання питомої ємності матеріалу електроди.

У ефектному *шостому розділі* висвітлено розроблений на основі так званої теорії часткового заряду модель зародкування шпінелевої фази при золь–гель-синтезі у водному розчині в результаті взаємочину гідрокомплексів заліза та ніклю, а також результати експериментальної перевірки різними методами адекватності цього моделю. Авторкою дисертації було застосовано модифікований квазіхімічний підхід до аналізу дефектів кристалічної ґратниці нікелевого фериту $Ni_xFe_{3-x}O_{4-\delta}$. Одержані теоретичні висновки було апробовано при синтезі ультрадисперсних шпінелей Fe_3O_4 та $NiFe_2O_4$ методом сумісного осадження із описом їхніх кристалічного та магнетного порядків.

До шостого розділу принципів зауважень немає. Водночас, з тексту не ясно, в чому ж полягає декларована модифікація квазіхімічної методи, застосованої у аналізі дефектної кристалічної структури нікелевої шпінелі. І мені здається, що використаний тут підхід (який в значній мірі виходить з розвідок Смирнова–Матисіної та Хачатуряна–Покровського, започаткованих ще задовго до статей В. М. Таланова) ще потребує врахування у статистично-термодинамічній аналізі рівноважного розподілу взаємодійних йонів по вузлах і міжвузловинах різного типу нестехіометричної шпінелі ефектів розмірної невідповідності йонів із доступними для них положеннями у її ґратниці (хоча б за Кривоглазом–Хачатуряном).

У цікавому та ґрунтовному *сьомому розділі* проаналізовано вплив умов синтези на кристалічну та магнетну структури системи «нікель-залізна шпінель/так званий «відновлений оксид графену»», одержаних гідротермальною методом, а також із застосуванням методи золь–гель-самозаймання. Авторкою проведено порівняльну аналізу електрофізичних властивостей композиту та простежено зміни магнетного порядку із застосуванням методи Мессбауєрової спектроскопії. Для нанорозмірних шпінелей $NiFe_2O_4$ та нанокомпозитів « $NiFe_2O_4$ /так званий «відновлений оксид графену»» здійснено порівняння впливу застосування різних комплексоутворювачів, а саме, гліцину, лимонної кислоти та сечовини, на морфологічні характеристики зазначених матеріалів і зміни їхнього магнетного порядку. Важливими досягненнями стали виявлення впливу різних механізмів гелеутворення на характеристики одержуваного композиту та масштабний за обсягом виконаної роботи дослід, метою якого було вивчення методом Мессбауєрової спектроскопії суперпарамагнетної поведінки феритної складової композитів, одержаних за різних умов експерименту. Встановлено, зокрема, що використання композиту « $NiFe_2O_4$ /так званий «відновлений оксид графену»», одержаного за допомогою сечовини, уможливило зменшити ступінь агломерації частинок композиту та забезпечити оптимальні характеристики електронного та йонного транспорту і досягнути питомої ємності до 215 Ф/г.

Щодо сьомого розділу є таке побажання: було б корисним у майбутньому синтезувати й інші електроліти, порівняння яких уможливило б розширити межі застосовності одержаних експериментально даних і уявлень.

Та сформульовані вище зауваження стосовно дисертації пані В. М. Бойчук почасти носять дискусійний характер і не можуть понизити загальної оцінки результатів її роботи.

У цілому ця робота є самостійним і завершеним (в межах поставлених *трудомістких* задач) кваліфікаційним дослідженням. Її авторка одержала *оригінальні* важливі наукові результати. Представлені результати та розвинуті уявлення щодо впливу умов синтези на структуру та морфологію композитів для досягнення оптимального відгуку при застосуванні гібридного конденсатора як електроди здаються мені цілком фізичними та забезпечують обґрунтованість сформульованих наукових висновків.

Вірогідність одержаних наукових знань забезпечується: застосуванням сучасних метод формування й оброблення нанорозмірних оксидних, сульфідних і вуглецевих матеріалів, задіяним комплексом експериментальних метод для дослідження процесів у електрохімічних системах, що базується на сучасних приладах, ретельною аналізою експериментальних даних для різного типу композитних систем.

Крім того, на користь коректності ряду результатів свідчать їхня узгодженість із відомими з літератури експериментальними даними (одержаними іншими дослідниками інакшими методами) та кількісний збіг з наявними розрахунковими результатами (навіть у рамках

інакших трактувань, але на основі моделей, адекватних області явищ, які вивчаються).

Стосовно практичної цінності маю зазначити, що одержані дані уможливають сформулювати цілісні фізичні уявлення про механізми накопичення заряду в електродах на основі нанодисперсних композитів, компонентами яких виступають сполуки нікелю чи то молібдену (гідроксид нікелю, діоксид та дісульфід молібдену, залізо-нікелева шпінель) та карбонові наноматеріали (мікро- та мезопоруваті вуглеці, так званий «відновлений оксид графену»).

Результати дисертації можна використати для завбачення електрофізичних і морфологічних властивостей композитних систем, а також у впровадженні відповідних знань у навчальний процес при викладанні дисциплін «Фізика і хімія поверхні», «Методи одержання наноматеріалів», «Наноматеріали в пристроях генерації та накопичення енергії» (у ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника» та інших ВНЗ) при підготовці магістрів за спеціальністю «105 Прикладна фізика та наноматеріали».

Одержані результати можна також рекомендувати для використання у наукових групах і лабораторіях наноматеріалознавства таких установ як ХНУ ім. В. Н. Каразіна, НТУ України «КІІ імені Ігоря Сікорського», НТУ «ХП», СумДУ МОН України та ІІІЦ «ХФТ», ІІМ ім. І. М. Францевича, ІФ, ІМФ ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

Методичне значення виконаної дисертаційної роботи полягає у значному внеску в розвиток наукового напрямку одержання функціональних наноматеріалів із сукупністю наперед заданих фізико-хімічних властивостей.

Роботу побудовано логічно, в основному написано науковою українською мовою та структуровано відповідно до вимог ДАК МОН України щодо оформлення дисертацій.

Результати роботи викладено в працях, опублікованих у фахових наукових журналах, збірниках наукових праць і патентах, оприлюднено на багатьох міжнародних конференціях.

Вміст і основні положення дисертації цілком і вірно відображено в авторефераті дисертації. А головним зауваженням до тексту в ньому є наступне. На жаль, певно за браком місця у авторефераті, при всій привабливості багатьох одержаних результатів авторці не вдалося гут чітко зрозуміти саме фізичні причини встановлених закономірностей впливу саме тих структурних і технологічних параметрів, регулювання яких власне її уможливило одержати чи то оптимізувати досягнуті характеристики електрохімічних конденсаторів.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота пані В. М. Бойчук є завершеним у межах поставлених завдань науковим дослідженням, її виконано на рівні сучасної експериментальної фізики наноструктурованих і нанорозмірних систем і, певна річ, є корисним кроком у з'ясуванні впливу умов синтези, структурних і морфологічними характеристик нанодисперсних гідроксидів нікелю, дісульфідів та діоксидів молібдену, ультрадисперсної нікель-залізної шпінелі та композитів на основі цих кристалохімічних сполук і карбонвмісних наномасштабних систем на ємнісні параметри процесу розрядження електрохімічних конденсаторів на основі зазначених матеріалів.

За актуальністю тематики, науковою новизною та значимістю одержаних результатів, обсягом їх, вірогідністю та ступенем обґрунтованості сформульованих наукових висновків і рекомендацій, повнотою викладення їх в опублікованих працях дисертаційна робота «Синтез, структурно-морфологічні та електрохімічні властивості наносистем на основі сполук Ni та Mo і вуглецевих матеріалів» задовольняє встановленим критеріям ДАК МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме, 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, №1159 від 30.12.2015 та №567 від 27.07.2016). Тому я вважаю, що авторка дисертації, пані Володимира Михайлівна Бойчук, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.18 – фізика і хімія поверхні.

Директор Інституту металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України
чл.-кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф.

В. А. Татаренко

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
030215/448
02 12 2019