

к.х.н., н.с. Парійська О.О.; пров. інженер Мазур Д.О.

РОБОТА

«Нові поліфункціональні каталізатори процесів одержання і використання «зеленого» водню для новітньої енергетики і сучасного хімічного виробництва»

висувається для участі у конкурсі зі здобуття премії Президента України для молодих вчених у 2024р.

Представлено Інститутом фізичної хімії
ім. Л.В. Писаржевського НАН України

Актуальність роботи

2

Однією з найважливіших задач розвитку сучасної економіки України і розвинених країн світу є декарбонізація і так званий "зелений" перехід" – відмова від процесів, що підвищують викиди вуглецю в атмосферу. Ключовою речовиною в альтернативній енергетиці та багатьох процесах тонкого і багатотонажного органічного синтезу є водень.

Крім виробництва "зеленого" палива - водню, важливе значення також має використання цієї речовини у промисловості та господарстві. Водень наразі широко використовується для одержання цінних органічних речовин в процесах гідрування, зокрема, компонентів моторних палив, розчинників, а також в тонкому органічному синтезі активних речовин для фармацевтики і агрохімії. Створення нових матеріалів для одержання водню і його ефективного використання має важливе значення для повоєнного відновлення економіки України.

Мета роботи

Мета роботи полягала у встановленні впливу складу і будови композитів наночастинок перехідних металів та їх сполук (карбіди, сульфіді, нітриди тощо) з вуглецевими матеріалами (графенові, вуглець, допований гетероатомами N, S, P та іншими) на їх електрокаталітичні властивості в процесах виділення водню та каталітичні властивості в процесах гідрування ненасичених органічних сполук воднем, та у створенні ефективних каталізаторів одержання водню в електрохімічних процесах та гідрування на основі таких композитів для використання в сучасній техніці і промисловості.

Наукові завдання роботи

3

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні наукові задачі:

- розробити методи одержання нанокompозитів різного складу, встановити їх хімічний склад і будову, зокрема, визначити розмір металвмісних частинок, встановити фазовий склад композитів, охарактеризувати вуглецеву компоненту;
- дослідити електрокаталітичні властивості одержаних композитів в процесах виділення водню;
- дослідити каталітичні властивості одержаних композитів в процесах гідрування органічних сполук воднем.

Деякі з досліджених композитів є ефективними електрокаталізаторами відновлення кисню для паливних комірок; таким чином, розроблені в роботі матеріали також мають перспективу використання в якості катодних матеріалів для електродів паливних комірок, що працюють на водні та кисні.

Особливість досліджуваних систем – одні і ті ж центри можуть виявляти активність як в електрокаталітичних процесах за участю водню, так і в каталітичних процесах гідрування воднем

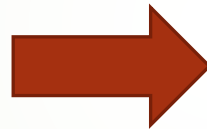
Створення композитів, що виявляють каталітичну активність в електрохімічних та хімічних процесах за участю водню

4

Піроліз сполук металів з органічними дискретними чи полімерними лігандами



Формування наночастинок металів на вуглецевих носіях (активоване вугілля, оксид графену тощо)



Композит, що містить
1. Наночастинки металів та/або наночастинки карбідів, сульфідів металів та/або сполуки металів (такі, як Co-N-C центри)
2. Частилки вуглецю, допованого вуглецю, графеноподібного вуглецю, оксиду графену тощо

Основні методи дослідження будови композитів:

Рентгенівська дифракція:
визначення фазового складу, оцінка розміру кристалічних частинок

Просвітлювальна та скануюча електронна мікроскопія:
визначення розміру частинок

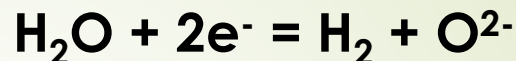
Рентгенфотоелектронна спектроскопія (РФЕС, XPS):
Визначення електронного стану металів та функціональних груп в вуглецевому носії

Дослідження електрокаталітичних та каталітичних властивостей КОМПОЗИТІВ

5

Електрокаталітичні процеси

Реакція виділення водню



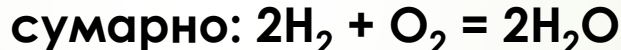
Реакції, що проходять в паливному елементі, який виробляє електричний струм:



реакція окиснення водню

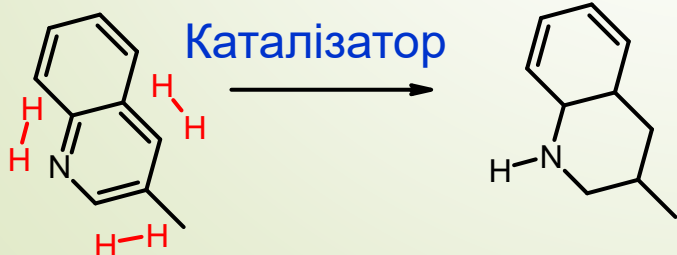


реакція відновлення кисню



Електрокаталітичні властивості оцінюються по зміні параметрів циклічної вольтамперометрії та інших електрохімічних експериментів (величини потенціалу та струму процесів, тафелівський нахил кривих тощо)

Каталітичне гідрування ненасичених органічних сполук

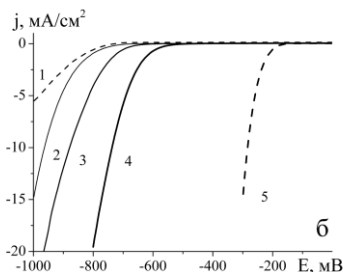
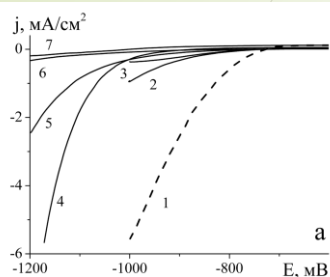


Каталітичні властивості оцінюються по виходу продуктів гідрування в певних умовах (тиск, температура, тривалість гідрування) порівняно з каталізаторами, які містять платинові метали або іншими промисловими каталізаторами

N-вмісні органічні супряжені полімери як каталізатори електрохімічного виділення водню

6

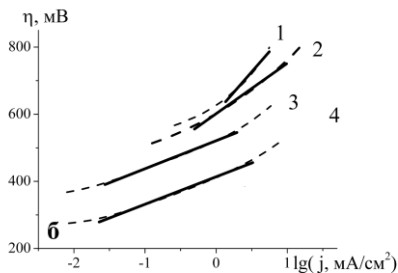
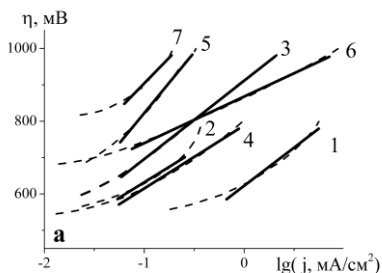
N-вмісні супряжені полімери: полі-о-фенілендіамін (ПоФДА), полі-м-фенілендіамін (ПмФДА), полі-о-амінофенол (ПАФ), полііндол (ПІн), полі-5-аміноіндол (ПАІн), полі-8-амінохінолін (ПАХ), полі-2-амінопідинін (ПАП), поліанілін (ПАН) та поліпірол (ППі)



Поляризаційні криві для склографітових електродів (1) модифікованих а) ПАП (2), ПІн (3), ПмФДА (4), ПАФ (5), ППі (6) і ПАН (7). Та б) ПоФДА (2), ПАХ (3), ПАІн (4), Рf/C (5)

Параметри реакції виділення водню (РВВ) на немодифікованому GC-електроді і GC-електроді, модифікованому N-вмісними супряженими полімерами

ОСП	b, мВ/dec	j_0 , мА/см ²	η_j , мВ $j=5$ мА/см ²	η_j , мВ $j=1$ мА/см ²
GC*	174	$2,4 \times 10^{-7}$	779	639
ПАІн	84	$1,3 \times 10^{-8}$	488	414
ПАХ	82	$4,6 \times 10^{-10}$	617	526
ПоФДА	147	$8,4 \times 10^{-8}$	709	608
ПмФДА	128	$1,6 \times 10^{-10}$	970	867
ПАП	191	$7,0 \times 10^{-8}$	-	804
ПАФ	219	$6,9 \times 10^{-8}$	-	925
ПІн	262	$4,5 \times 10^{-7}$	-	>1000
ППі	278	$1,1 \times 10^{-7}$	-	>1000
ПАН	279	$5,8 \times 10^{-8}$	-	>1000



Поляризаційні криві в тафелівських координатах для склографітових електродів (1) модифікованих а) ПАП (2), ПІн (3), ПмФДА (4), ПАФ (5), ППі (6) і ПАН (7). Та б) ПоФДА (2), ПАХ (3) і ПАІн (4).

b – тафелівський нахил;

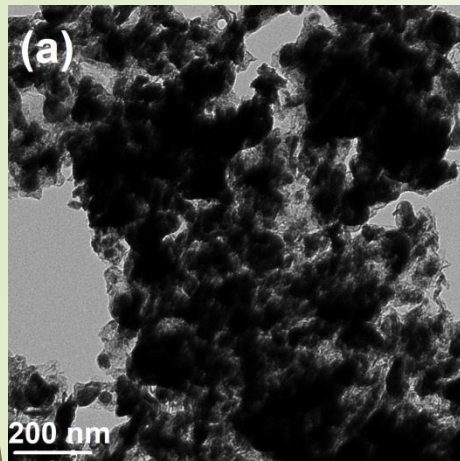
η_j – перенапряга виділення H₂ при заданій густині струму мА/см²;

j_0 – струм обміну виділення H₂

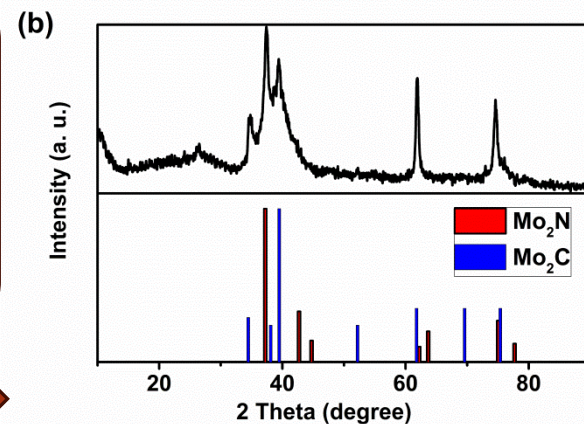
Ряд N-вмісних органічних супряжених полімерів (ОСП) проявляє електрокаталітичну активність у реакції виділення водню у водних кислих електролітах та встановлено кінетичні параметри РВВ на склографітових електродах (GC), модифікованих плівками таких ОСП

Наноккомпозит на основі N,P-допованого відновленого оксиду графену і Mo_2C та Mo_2N – ефективний електрокаталізатор виділення водню в широкому діапазоні pH

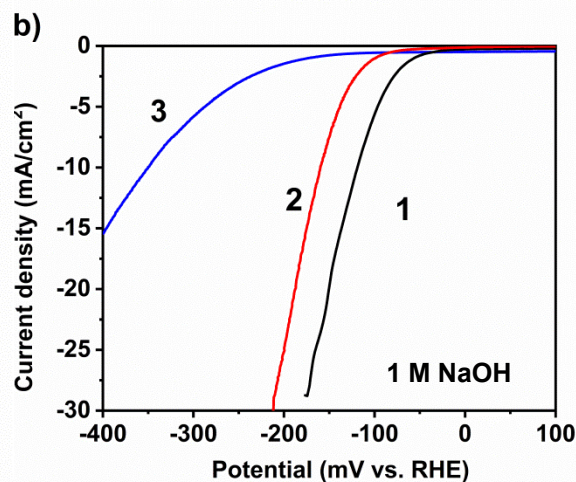
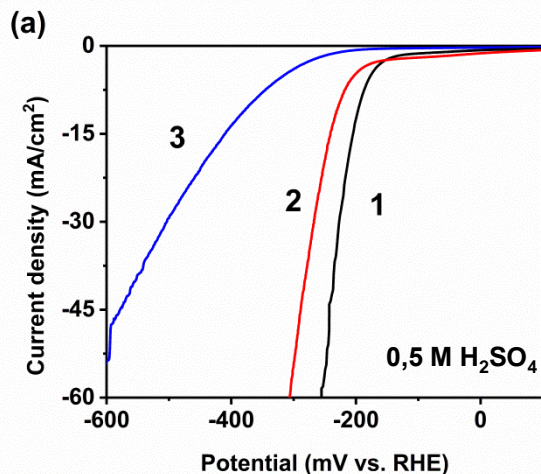
7



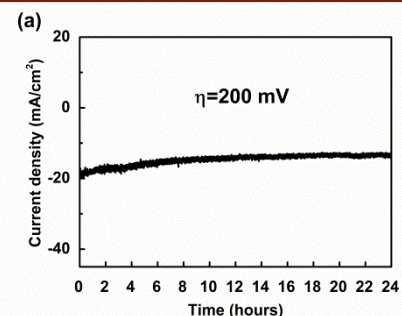
Високотемпературною обробкою гібридного композиту на основі полі-5-аміноіндолу, 12-фосформолібденової кислоти та відновленого оксиду графену (rGO) отримано карбонізований наноккомпозит, що складається з допованого атомами азоту і фосфору відновленого оксиду графену та наночастинок Mo_2C і Mo_2N



Висока активність композиту
 $(\eta_{10} \sim 195 \text{ мВ}; b \sim 60 \text{ мВ/порядок в } 0,5\text{M H}_2\text{SO}_4 \text{ і } \eta_{10} \sim 119 \text{ мВ}; b \sim 57 \text{ мВ/порядок в } 1,0\text{M NaOH})$
 пояснюється спільним каталітичним впливом різних активних центрів у композиті - Mo_2C , Mo_2N , C/N_x , C/P_x . Одержаний електрокаталізатор має високу стабільність при тривалому функціонуванні в процесі виділення водню

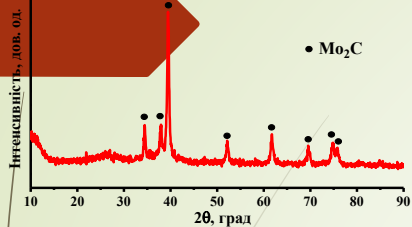


Поляризаційні криві виділення водню для композитів $\text{Mo}_2\text{C}, \text{Mo}_2\text{N}/\text{N}, \text{P}-\text{rGO}$ – 1 $\text{MoO}_2, \text{Mo}_2\text{C}/\text{N}-\text{rGO}$ – 2 (отриманий з використанням 12-кремніймолібденової кислоти) і $\text{Mo}_2\text{C}/\text{N}, \text{P}-\text{C}$ – 3 (за відсутності оксиду графену) в $0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ (а, в) і $1,0 \text{ M NaOH}$ (б, г)

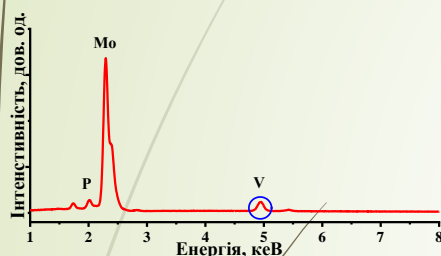


Наноконпозиційний електрокаталізатор виділення водню на основі допованого ванадієм Mo_2C та N,P-допованого відновленого оксиду графену ($\text{V-Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$)

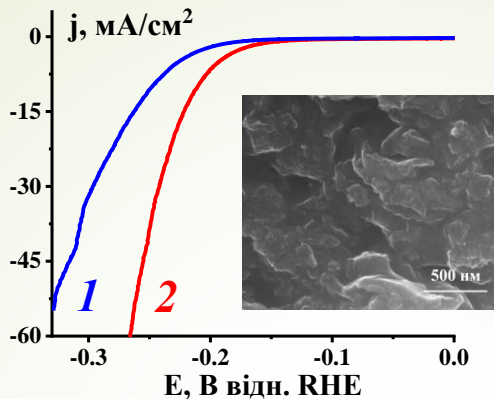
8



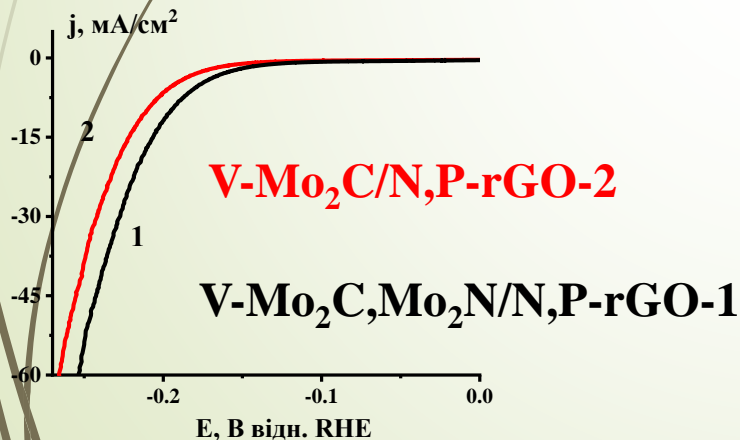
Дифрактограма $\text{V-Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$



Присутність V в композиті (2,6 ат.%) підтверджено методом EDX



Поляризаційні криві у 0,5 M H_2SO_4 для $\text{V-Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$ (1) та аналогу, де допування ванадієм відсутнє – $\text{Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$ (2).



Поляризаційні криві у 0,5 M H_2SO_4 для $\text{V-Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$ (2) та аналогу, одержаного з використанням полі-5-аміноіндолу замість поліпіролу, який призводить до утворення фази Mo_2N – $\text{V-Mo}_2\text{C,Mo}_2\text{N/N,P-rGO}$ (1).

Основні параметри реакції виділення водню для $\text{V-Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$ каталізатору та аналогу, де допування ванадієм відсутнє ($\text{Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$)

Каталізатор	b, мВ/порядок	η_{10} , мВ	E_{onset} , мВ відн. RHE
0,5 M H_2SO_4			
$\text{Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$	69	248	-156
$\text{V-Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$	60	210	-138
1,0 M NaOH			
$\text{Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$	92	166	-82
$\text{V-Mo}_2\text{C/N,P-rGO}$	60	150	-66

b – тафелівський нахил;

η_{10} – перенапряга виділення H_2 при 10 mA/cm^2 ;

E_{onset} – потенціал початку виділення H_2

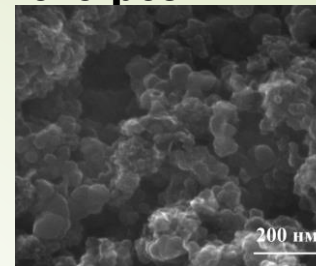
Композит може діяти як ефективний електрокаталізатор процесу виділення водню з води як з кислих, так і з лужних електролітів, та характеризується високою стабільністю при тривалому функціонуванні в процесі виділення водню.

Кобальт-азот-вуглецеві (Co-N-C) електрокаталізатори відновлення кисню, одержані з використанням глибоко евтектичного розчинника

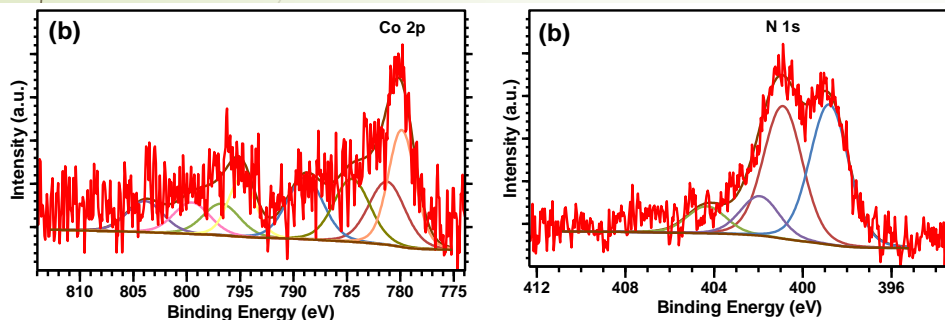
9

джерело Co, N та C: глибоко евтектичний розчинник на основі [Bmim]Cl та $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
джерело C: ацетиленова сажа

800°C,
Ar



Остовні рівні РФЕ спектрів Co2p та N1s для Co-N-C

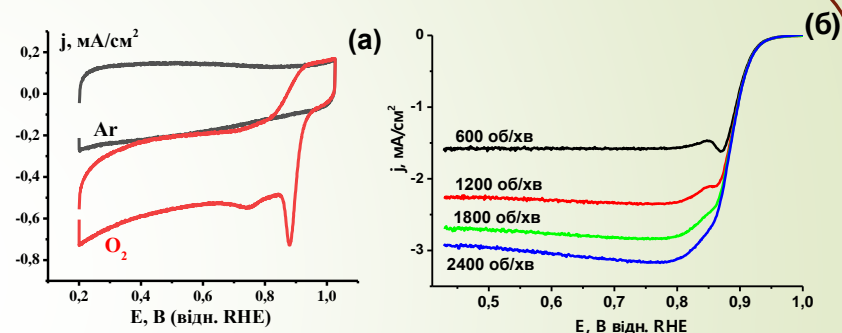


Наявність Co-N-C центрів підтверджується даними РФЕ спектроскопії

Характеристики Co-N-C та Pt/C каталізаторів у процесі відновлення кисню

Каталізатор	E_{onset} , В	$E_{1/2}$, В	n
Co-N-C	0,99	0,88	3,80
Pt/C	1,03	0,90	4,00

E_{onset} – потенціал початку відновлення O_2 ; $E_{1/2}$ – потенціал напівхвилі; n – кількість e⁻, що приймає участь у відновленні молекули O_2

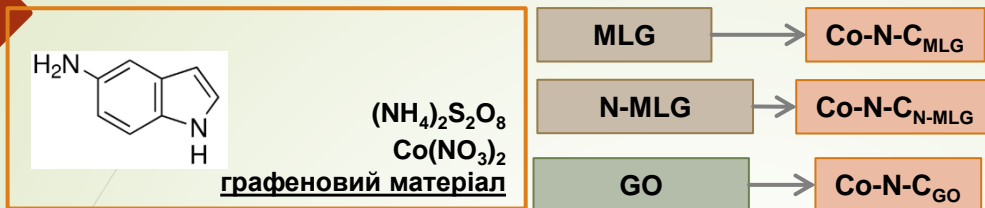


Отримані для Co-N-C циклічні вольтамперограми у деаерованому та насиченому киснем 1,0 M NaOH (а) та поляризаційні криві у насиченому киснем 1,0 M NaOH (б)

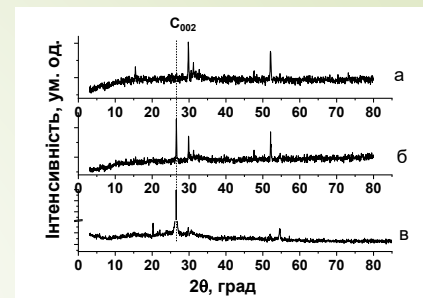
Нові Co-N-C електрокаталізатори виділення водню з води відрізняються від відомих аналогів більш високою ефективністю та можуть бути використані для електрохімічного одержання "зеленого" водню, як катодні та анодні матеріали паливних комірок, які генерують електрику за рахунок окиснення водню та відновлення кисню. Активність розроблених електрокаталізаторів у лужному електроліті в процесі відновлення кисню майже не поступаються Pt/C.

Отримані з використанням полі-5-аміноіндолу і графенових матеріалів біфункціональні Co-N-C електродні матеріали відновлення кисню (РВК) та виділення водню (РВВ)

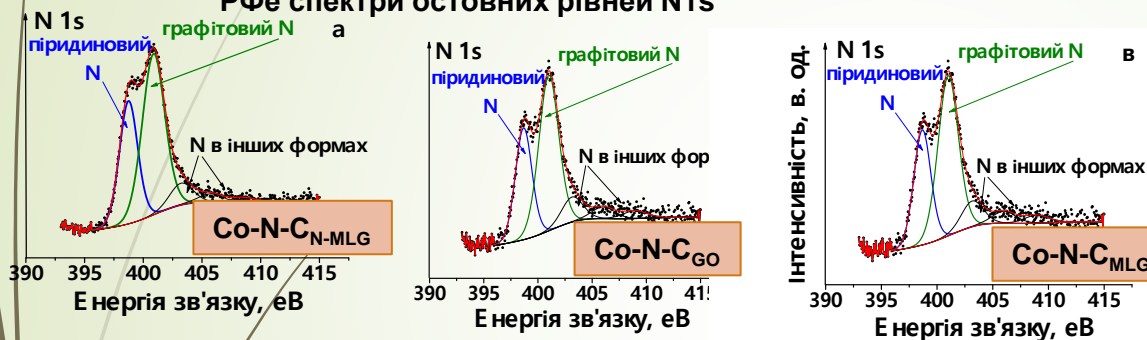
10



Дифрактограми наноконкомпозитів



РФЕ спектри основних рівней N1s



Наявність Co-N-C центрів підтверджується даними РФЕ спектроскопії

Елементний склад отриманих композитів на основі даних РФЕС

Композит	C, ат.%	O, ат.%	N, ат.%	Co, ат.%	S, ат.%
Co-N-C _{GO}	78,74	8,7	3,74	2,00	5,51
Co-N-C _{MLG}	76,54	12,2	2,35	2,35	4,86
Co-N-C _{N-MLG}	74,07	10,8	8,27	1,09	2,83

Кінетичні параметри РВК на електродних матеріалах

Параметр	Co-N-C _{GO}	Co-N-C _{MLG}	Co-N-C _{N-MLG}
$E_{1/2}$, мВ	618	666	673
n	3,4	3,8	3,0
b, мВ/порядок	98	85	73
j_0 , А/см ²	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$7,9 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$

Основні параметри РВВ на електродних матеріалах

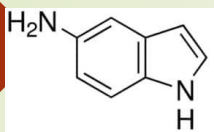
Електродний матеріал	b, мВ/порядок	j_0 , мА/см ²	E_{onset} , мВ	η , мВ при 10 мА/см ²
Co-N-C _{MLG}	94	0.017	-211	260
Co-N-C _{GO}	103	0.018	-227	282
Co-N-C _{N-MLG}	69	0.010	-162	207

$E_{1/2}$ – потенціал напівхвилі; n – кількість e⁻, що приймає участь у відновленні молекули O₂; b – тафелівський нахил; j_0 – струм обміну

Ефективні каталізатори виділення водню та відновлення кисню для використання в якості електродних матеріалів для паливних комірок та електролізерів

Наноккомпозити на основі Co₉S₈, N, S-допованого вуглецю та Co₉S₈ – каталізатори гідрування хіноліну та його похідних

11

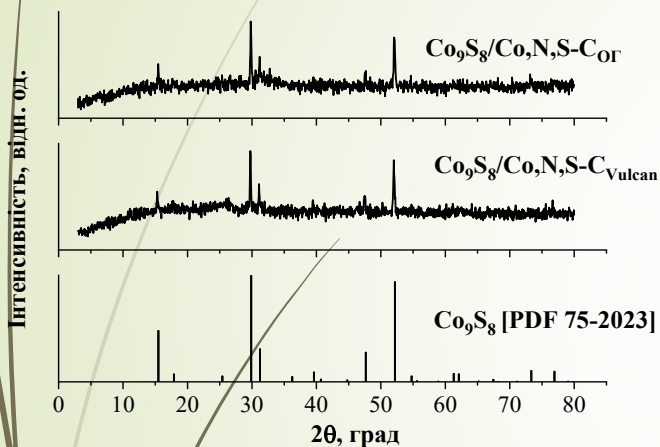


+Co(NO₃)₂ + Vulcan XC72 або оксид графену +(NH₄)₂S₂O₈

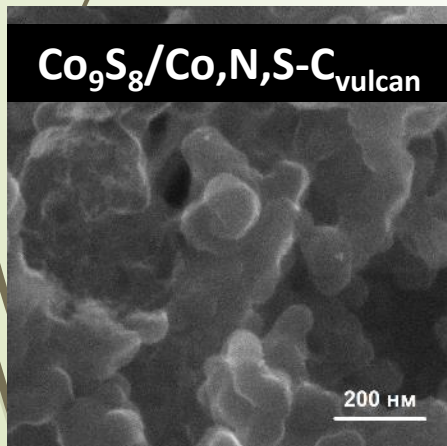
Co₉S₈/Co,N,S-C_{vulcan}

800°C, Ar, 2 год

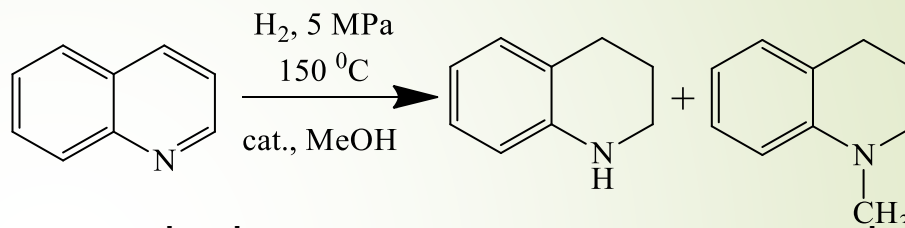
Co₉S₈/Co,N,S-C_{or}



Дифрактограми одержаних композитів



SEM мікрофотографія



Гідрування хіноліну молекулярним воднем в присутності каталізаторів Co₉S₈/Co,N,S-C та Co₉S₈ [150°C, 50 атм, 24 год, метанол]

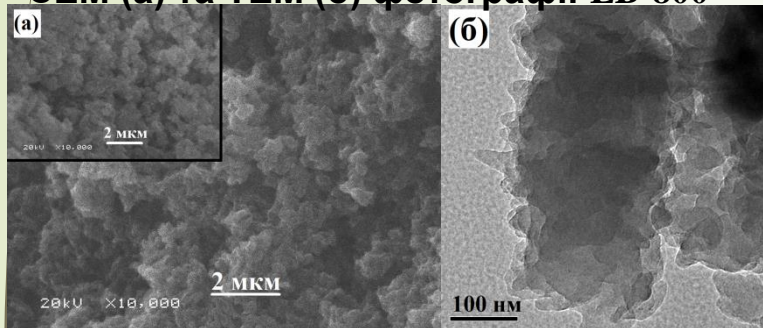
Каталізатор	Конверсія, %	Вихід ТГХ, %	Селективність, %
Co ₉ S ₈ /Co,N,S-C _{vulcan}	100	~ 100	~ 100
Co ₉ S ₈ /Co,N,S-C _{or}	89	77	86
Co ₉ S ₈ /Co,N,S-C _{ПАІН} (без вуглецевої компоненти)	78	73	93
Co ₉ S ₈	26	19	73

Одержані композити можуть бути використані як каталізатори гідрування хіноліну і його похідних на заміну платинових металів

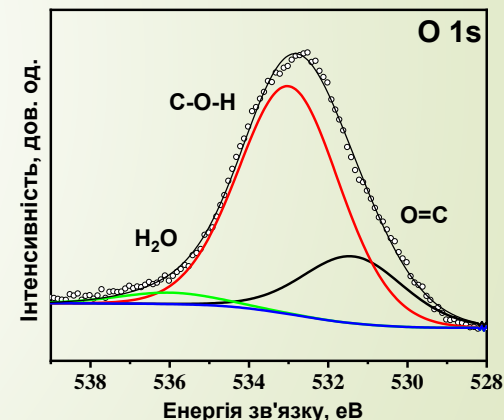
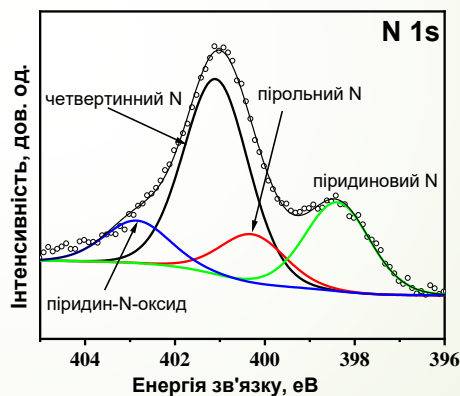
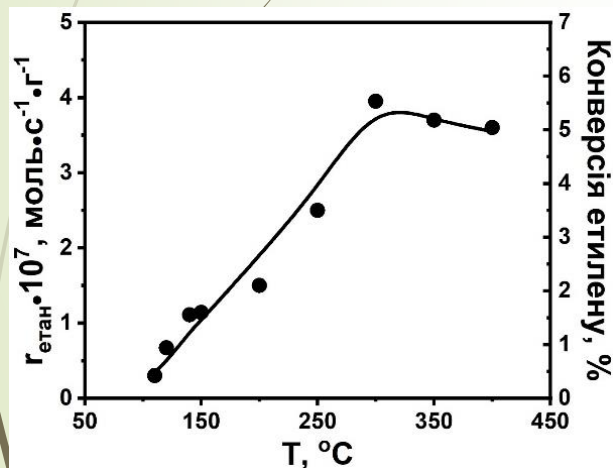
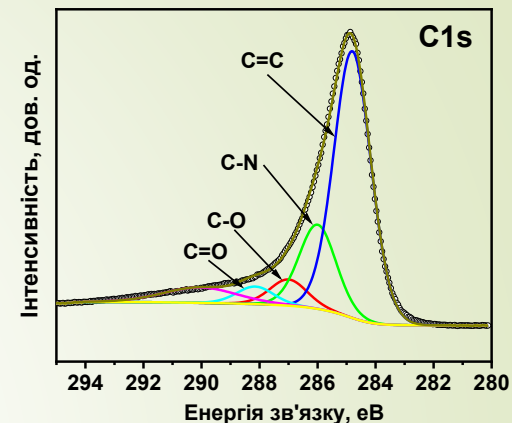
Каталітична активність карбонізованого поліаніліну (ЕВ-800) в процесах гідрування молекулярним воднем органічних субстратів з подвійним С=С зв'язком та нітрогрупою

12

SEM (а) та TEM (б) фотографії ЕВ-800



Карбонізація поліаніліну веде до формування нових N-C центрів, які, ймовірно, відповідають за каталітичну активність



C1s, N1s та O1s РФЕ спектри поліаніліну піролізованого в відновлювальній атмосфері при 800°C.

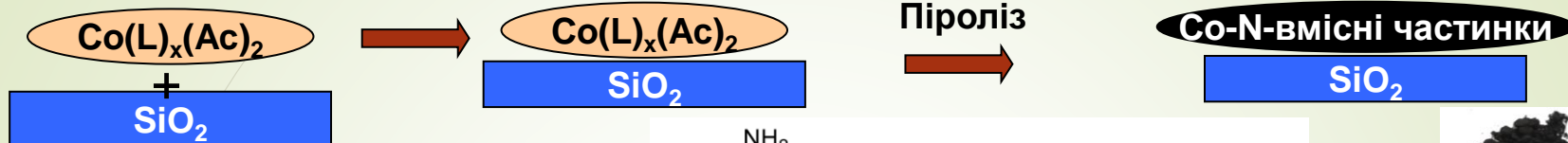
Температурна залежність швидкості утворення та конверсії етану на ЕВ-800 в реакції гідрування етилену. Наважка ЕВ-800 – 0,2 г; швидкість витрати газової суміші (10% C₂H₄, 90% H₂) – 20 мл/хв.

Карбонізований поліанілін може бути використаний як каталізатор гідрування, так і як носій для каталізаторів гідрування

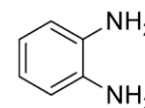
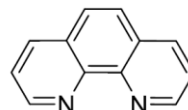
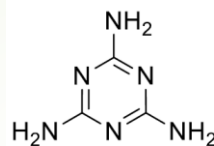
НАНОКОМПОЗИТИ КОБАЛЬТУ ДЛЯ КАТАЛІТИЧНОГО ГІДРУВАННЯ ХІНОЛІНУ

Розроблено нові композити наночастинок кобальту і пористих носіїв – каталізатори гідрування азотвмісних гетероциклічних сполук, які формуються при піролізі комплексів кобальта, нанесених на аеросил

13



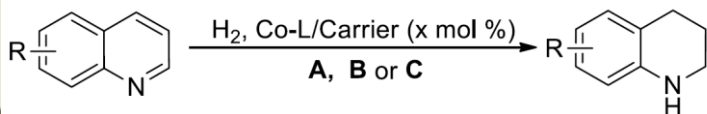
Ліганди, використані для синтезу композитів:



Термічний розклад комплексів металів веде до формування

- наночастинок металічного Co
- графеноподібних вуглецевих частинок, допованих азотом

Гідрування хінолінів на композитах Co-C/SiO₂

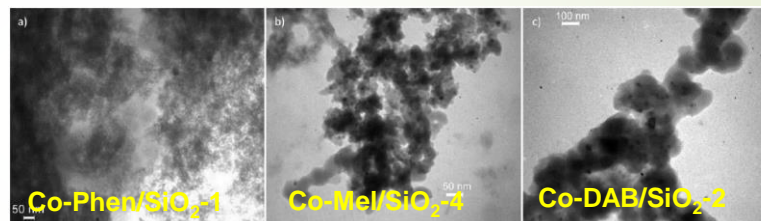


Умови А: 100 °C, 100 атм, CH₃OH, 24 год, x = 1

Умови В: 150 °C, 100 атм, CH₃OH, 24 год, x = 1

Умови С: 100 °C, 100 атм, CH₃OH, 24 год, x = 3

Підібрано умови для гідрування широкого ряду заміщених хінолінів з виходами, що наближаються до 100 %



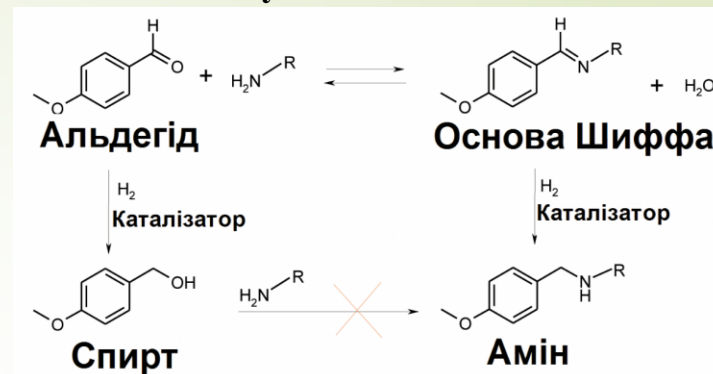
Композити нанорозмірного кобальту і вуглецевих частинок придатні для каталітичного гідрування широкого ряду органічних сполук в лабораторних і промислових масштабах на заміну системам на основі платинових металів, що має важливе значення для зменшення залежності вітчизняного хімічного виробництва від дорогих каталізаторів

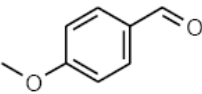
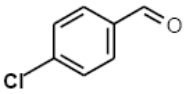
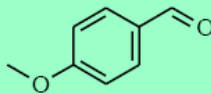
Кобальтвмісні композити - каталізатори амінування карбонільних сполук

14

Одержано композити нанорозмірного кобальту і вуглецевих частинок, які виявили високу продуктивність в процесах каталітичного амінування ароматичних альдегідів амінами в присутності водню, а також гідрування хіноліну

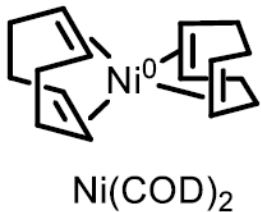
Реакції, які відбуваються при амінуванні альдегідів



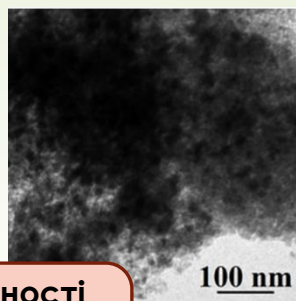
Альдегід			
ш(кат), Т, Р, амін	30 мг 100 С 100 атм бутиламін 1,5 ммоль	30 мг 100 С, 100 атм диізопро- піламін 1,5 ммоль	30 мг 100 С 100 атм бензиламін
			30 мг 100 С 100 атм бутиламін 1,5 ммоль 4-СІВА
			30 мг 100 С 100 атм MeCN 4 години
			30 мг 100 С 100 атм MeCN 24 години
Co-Phen/ SiO ₂ -1	амін 86% спирт 2% азометин 12%	спирт 90% вихідн 10%	амін 92% спирт 6% азометин 2%
Co-DAB/ SiO ₂ -1	амін 87.5% спирт 12.5%	спирт 99%	амін 91,5% спирт 8,5%
Co-DAB/ SiO ₂ -2	амін 94% спирт 6%	спирт 99%	амін 96% спирт 4%
Co-Mel/ SiO ₂ -4	амін 72% спирт 19% азометин 9%	спирт 99%	амін 73% спирт 27%
			Cl-амін 68% Cl-спирт 4%
			Cl-амін 89%
			Cl-амін 74%
			Cl-амін 70% Cl-спирт 7% домішка 12%
			видізн. 65% спирт 26% азометин 8%
			видізн. 21% спирт 6% азометин 74%
			видізн. 26% спирт 11% азометин 63%
			спирт 80% азометин 16%
			спирт 64% азометин 33%
			исх. 9% спирт 72% азометин 17%

Нікельвмісні каталізатори гідрування органічних сполук

15



Пористий носій



Розклад комплексу нікелю (0) Ni(COD)₂ в присутності пористого носія призводить до формування на його поверхні наночастинок часткового окисненого нікелю

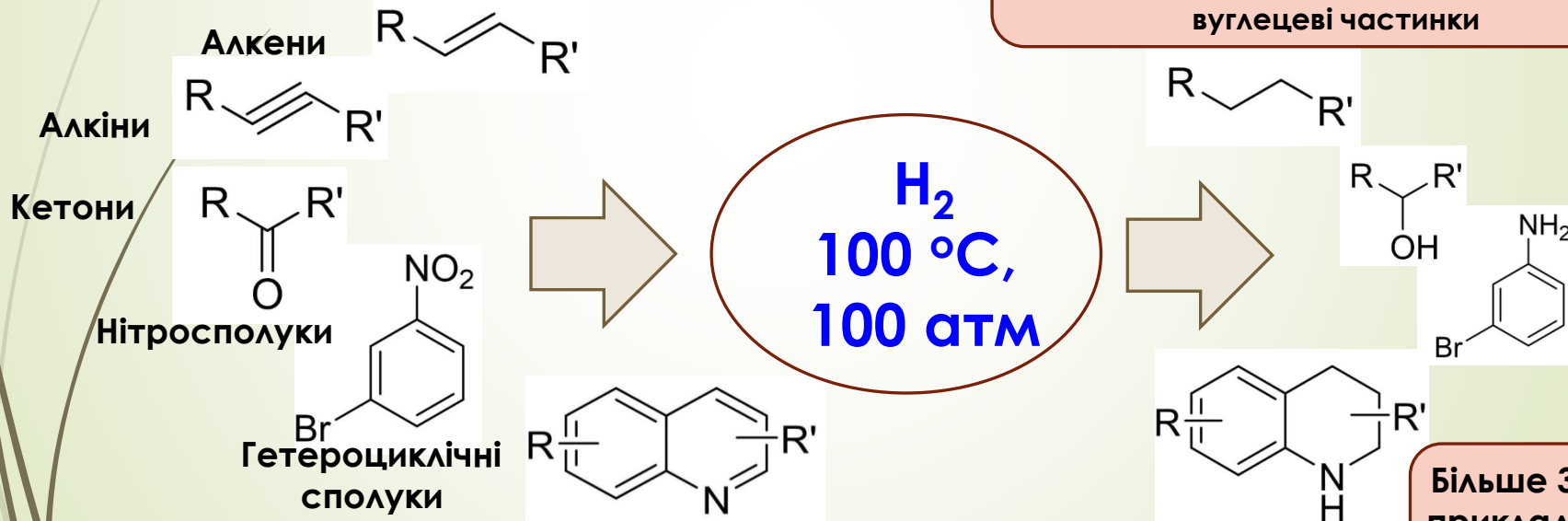


Піроліз

Ni-N-вмісні частинки



Піроліз комплексу нікелю(II) з фенантроліном на аеросилі призводить до формування композиту, що містить наночастинки нікелю і вуглецеві частинки



Продуктивність композитів наближається до систем на основі металів платинової групи

Більше 30 прикладів
Вихід до 100 %

Основні результати роботи

16

- ▶ Вперше виявлено можливість підвищення ефективності роботи систем системи кобальт-азот-вуглець (Co-N-C) за рахунок використання глибоких евтектичних розчинників (так званих DES). Перевагами використання DES як прекурсорів є високий вміст у них кобальту та азоту, а також здатність забезпечувати рівномірний розподіл атомів Co і N в електрокаталізаторі. Отримані композити мають високу каталітичну активність в процесі відновлення кисню, і можуть бути використані як катодні матеріали для паливних елементів, що працюють за рахунок споживання водню та кисню. Електрокаталітична активність таких композитів в процесі відновлення кисню у лужному електроліті майже не поступається каталізатору Pt/C. Розроблені Co-N-C системи характеризуються високою довготривалою електрохімічною стабільністю.
- ▶ Показано можливість використання полі-5-аміноіндолу разом з оксидом графену, багат шаровим графеном (MLG) або допованим азотом графеном для утворення композитів, які мають високу електрокаталітичну активність в реакції виділення водню з води та відновлення кисню. Використання 5-аміноіндолу з персульфатом амонію замість попередньо підготовленого полімеру дозволяє спростити синтез Co-N-C електрокаталізаторів. Заміна ацетиленової сажі на оксид графену в процесі утворення таких композитів веде до збільшення електрохімічно активної поверхні каталізатора і, як наслідок, покращення його струмових характеристик.

Основні результати роботи

17

Встановлено, що Co–N–C матеріали, утворені при піролізі сполук кобальту і полі-5-аміноіндолу, можуть виступати ефективними каталізаторами гідрування хіноліну та його монометилпохідних. Висока ефективність таких систем зумовлена насамперед наявністю в їх складі центрів Co-N_x, аналогічних тим, що обумовлюють електрокаталітичну активність таких композитів.

Показано здатність деяких азотвмісних супряжених полімерів (полі-о-фенілендіаміну, полі-5-аміноіндолу, полі-8-амінохіноліну) каталізувати електрохімічне виділення водню з водних кислих електролітів, що відкриває значні перспективи у їх використанні як компонентів нанокompозитних електрокаталізаторів зазначеного процесу.

Шляхом високотемпературної обробки гібридного композиту-попередника на основі полі-5-аміноіндолу, 12-фосформолібденової кислоти та відновленого оксиду графену (rGO) отримано карбонізований нанокompозит, що складається з допованого атомами азоту і фосфору відновленого оксиду графену та наночастинок Mo₂C і Mo₂N. Такий композит може діяти як ефективний електрокаталізатор процесу виділення водню з води як з кислих, так і з лужних електролітів, та може бути використаний в електролізерах різного типу. Електрокаталізатор має високу стабільність при тривалому функціонуванні в процесі виділення водню.

- ▶ Піролізом композитів-попередників на основі поліпіролу або полі-5-аміноіндолу, ванадійзаміщеної фосформолібденової кислоти та rGO одержано нові Mo_2C -вмісні гібридні електрокаталізатори реакції виділення водню, що уявляють собою N,P-допований відновлений GO з частинками Mo_2C , допованого ванадієм або з частинками Mo_2C і Mo_2N допованих ванадієм. Допування атомами ванадію *in situ* сприяє зростанню електрокаталітичної активності одержаних композитів в процесі виділення водню з води, що проявляється у значному зменшенні перенапруги виділення водню, як в кислому, так і лужному електролітах, а також у анодному зміщенні потенціалу початку процесу.
- ▶ Шляхом піролізу комплексів Co(II) з азотвмісними органічними лігандами, нанесених на дисперсний SiO_2 одержано композити, які виявили високу ефективність в процесі гідрування хіноліну і його похідних, каталітичного амінування ароматичних альдегідів амінами в присутності водню. Знайдено умови одержання 1,2,3,4-тетрагідрохіноліну і заміщених похідних з майже кількісними виходами. Розроблено методики для препаративного одержання відповідних продуктів гідрування в мультиграмових кількостях.
- ▶ Розроблено серію нікельвмісних композитів, які містять наночастинки нікелю на пористих носіях різної природи, які є ефективними каталізаторами гідрування широкого ряду органічних сполук (алкени, алкіні, карбонільні сполуки, нітросполуки, гетероцикли) воднем, зокрема фурфуролу до фурфурилового спирту, що може знайти використання для одержання цінних органічних речовин з відновлювальної сировини.

Практичне значення одержаних результатів

19

Розроблені каталізатори процесів виділення водню, окиснення кисню, які можуть знайти використання як електродні матеріали для електролізерів для одержання водню, а також для паливних комірок, що виробляють електроенергію за рахунок споживання водню та кисню. Використання таких електродних матеріалів зменшить витрати енергії як у виділенні водню, так і в паливних комірках за рахунок зменшення перенапруги електрохімічних реакцій (наближення потенціалу до термодинамічно рівноважного).

Розроблені каталізатори гідрування органічних сполук (зокрема, гетероциклів) в лабораторних і промислових масштабах, що має важливе значення для зменшення залежності вітчизняного хімічного виробництва від дорогих каталізаторів.

Переваги розроблених композитів: висока електрокаталітична та каталітична активність, відсутність платинових металів в їх складі, простота одержання, можливість масштабування (одержання великих партій матеріалів).

Крім того, розроблено ряд оригінальних електрохімічних методик одержання нових вуглецевих матеріалів, які можуть бути використані в медицині (для транспорту лікарських засобів в клітини або детоксикації).

До представленої роботи включено **45** наукових публікацій, в т.ч. **15** наукових статей (**13** – у англomовних журналах, що входять до наукометричних баз Web of Science та Scopus). Результати, наведені в роботі, було представлено на ряді наукових форумів, опубліковано в тезах **25** доповідей наукових конференцій та симпозіумів, в т.ч. **21** міжнародній конференцій. **Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно: Web of Science – 42/5, Scopus – 46/5, Google Scholar – 63/6.** Пріоритет і новизну розробок захищено **5** патентами України на винахід.