

З КАФЕДРИ ПРЕЗИДІЇ НАН УКРАЇНИ



СТРИЖАК
Петро Євгенович –
член-кореспондент НАН
України, завідувач відділу
Інституту фізичної хімії
ім. Л.В. Писаржевського
НАН України

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАНОКАТАЛІЗУ

**За матеріалами наукової доповіді
на засіданні Президії НАН України
21 травня 2014 року**

Розглянуто основні проблеми нанокаталізу – галузі фізичної хімії, яка бурхливо розвивається в останні десятиліття. Проаналізовано прояви нанорозмірного ефекту в каталізі. Висвітлено основні підходи щодо розроблення нових гетерогенно-каталітичних процесів та каталізаторів на основі сучасних наноматеріалів, зокрема наночастинок перехідних і благородних металів, різноманітних оксидних наносистем, нанопористих матеріалів, двовимірних наносистем. Сформульовано напрями подальших досліджень.

Ключові слова: каталіз, нанокаталіз, каталізатор, наноматеріали.

Вступ

Ефективність промисловості розвинених країн світу значною мірою зумовлена використанням сучасних гетерогенно-каталітичних процесів. Безпосередній та опосередкований внесок гетерогенного каталізу у внутрішній валовий продукт технологічно розвинених країн становить від 20 до 40%. В Україні понад 90% продукції хімічної промисловості виробляється в гетерогенно-каталітичних процесах.

Каталіз є одним із основних напрямів наукових досліджень Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України ще з часів заснування установи в 1927 р. Видатний внесок у розвиток каталізу зробили академіки Л.В. Писаржевський і В.А. Ройтер, члени-кореспонденти НАН України Я.Б. Гороховатський, В.М. Власенко, Г.І. Голодець. Вагомий внесок у сучасну науку про каталіз зробили видатні професори, які працювали в Інституті: В.М. Белоусов, В.Я. Вольфсон, Н.І. Ільченко, Г.П. Корнійчук, М.В. Павленко, М.В. Поляков, М.Я. Рубанік, М.Т. Русов, М.П. Самченко, О.А. Стрельцов.

Результати цих досліджень сприяли вирішенню багатьох фундаментальних і практичних проблем каталізу, але, водно-

час, поставили низку нових фундаментальних проблем, розв'язання яких спрямоване як на глибше розуміння каталітичних явищ, так і на створення більш ефективних промислових каталітичних процесів.

Такі проблеми сьогодні вирішуються на новому рівні завдяки розвитку нанонаук. Нанокаталіз можна неформально визначити як каталіз наноматеріалами, характерний розмір яких перебуває в діапазоні 1–100 нм. Нанокаталіз є одним із нових актуальних напрямів фізичної хімії. Цей напрям надзвичайно стрімко розвивається і охоплює широке коло сучасних хімічних процесів, вивчення яких уперше в Україні та одними з перших у світі було започатковано в Інституті фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України. За результатами таких досліджень уже видано дві монографії з нанофотокаталізу [1, 2].

Термін «нанофотокаталіз» було вперше введено академіком НАН України В.Д. Походенком та членом-кореспондентом НАН України С.Я. Кучмієм ще в 2005 р., тоді як бурхливе зростання публікацій у світовій науковій літературі з використанням терміна «нанокаталіз» спостерігається лише з 2006 р.

В Інституті започатковано проведення міжнародних конференцій «Нанофотоніка» та «Сучасні проблеми нанокаталізу».

Стрімкий розвиток нанокаталізу пов'язаний як з розвитком методів синтезу наноматеріалів контрольованої структури, серед яких особливий інтерес становлять наночастинки металів та їх оксидів, нанореактори на основі нанопористих матеріалів, нанокласти, двовимірні наноструктури, так і з революційним розвитком фізико-хімічних методів дослідження речовин на нанорозмірному масштабі. Саме завдяки такому прогресу в нанотехнологіях нанокаталіз сьогодні дозволяє вирішувати проблеми цілеспрямованого регулювання швидкості та селективності гетерогенно-каталітичних процесів.

Нанорозмірний ефект у каталізі

Нанорозмірний ефект у каталізі полягає в суттєвій залежності швидкості перебігу гетеро-

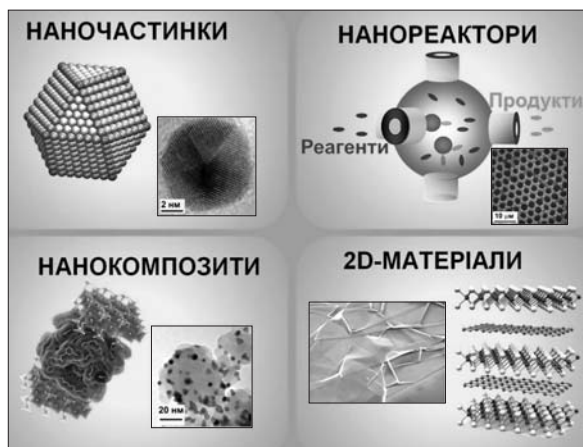


Рис. 1. Типові нанокаталізатори

генно-каталітичного процесу від розміру активної фази нанокаталізатора в нанодіапазоні. Найяскравіше такий ефект виявляється у випадку нанорозмірного золота. Наночастинки золота, розмір яких перебуває у вузькому інтервалі 2,5–3,5 нм, мають каталітичну активність у модельній окисно-відновній реакції окиснення монооксиду вуглецю киснем, тоді як масивне золото не виявляє жодної каталітичної активності. Нанорозмірне золото, нанесене на різні носії, є активним і в інших процесах, зокрема в окисненні вуглеводнів та відновленні оксидів азоту. Характерною ознакою таких процесів є немонотонна залежність каталітичної активності від розміру наночастинок золота в діапазоні 2–5 нм. Дослідження каталітичних властивостей нанорозмірного золота, яке виявляє надзвичайно високу активність і селективність в окисно-відновних реакціях, радикально змінили традиційні уявлення про каталітичну інертність цього металу, що стало визначальним поштовхом для проведення досліджень каталітичних властивостей наноматеріалів в останні десятиліття.

Однак і дотепер немає загальноприйнятого пояснення явища, пов'язаного з появою каталітичної активності матеріалів у нанорозмірному діапазоні. Дослідження фізико-хімічних властивостей різноманітних наноматеріалів установили можливість прояву **квантово-розмірного ефекту**, зумовленого залежністю

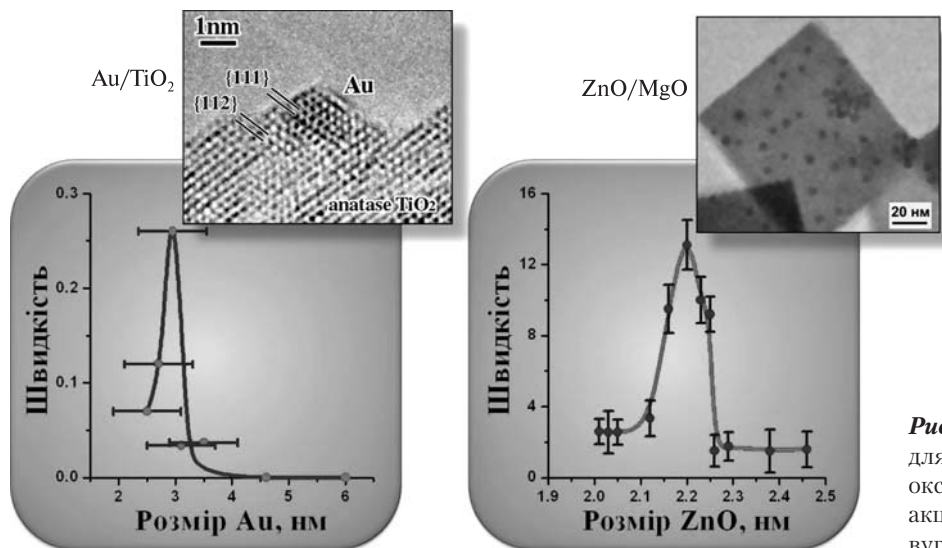


Рис. 2. Нанорозмірний ефект для наночастинок золота і оксиду цинку в модельній реакції окиснення монооксиду вуглецю киснем

енергетичних рівнів системи від її розміру. Переконливим прикладом прояву квантово-розмірного ефекту в нанокаталізі є оксид цинку — класичний нанооб'єкт, наночастинкам якого властиві квантово-розмірні ефекти. Такі ефекти приводять до збільшення ширини забороненої зони, підвищення редокс-потенціалу валентної зони та зони провідності за умови зменшення розміру наночастинок. Зміна розміру наночастинок оксиду цинку у вузькому інтервалі 2–3 нм спричинює значні зміни їх каталітичної активності, що є проявом квантово-розмірного ефекту в нанокаталізі.

Крім квантово-розмірного ефекту залежність каталітичної активності від розміру активного компонента каталізатора може бути зумовлена багатьма факторами, детально проаналізованими в огляді [3]. Згідно з класичними уявленнями щодо структурної чутливості гетерогенно-каталітичних реакцій (тобто залежності швидкості реакції від розміру активної фази), зміна швидкості зі зміною розміру наночастинок може бути спричинена різною каталітичною активністю активних центрів, розташованих на гранях, ребрах та кутах нанокристала, тобто суто **геометричним ефектом**. Геометричними ефектами можна пояснити залежність каталітичної активності від розміру. Ці ефекти є сьогодні найбільш зрозумілими та дослідженими.

Ефект загальної поверхні полягає в тому, що зі зменшенням розміру наночастинок збільшується питома поверхня матеріалу, внаслідок чого підвищується ефективність каталізатора. Аналогічними є ефекти **збільшення кількості поверхневих атомів, зростання кількості дефектів та зміни кількості низькокоординуваних атомів**. Каталіз може відбуватися на атомах, що знаходяться **на межі (по периметру) наночастинок**. **Ефект фрактальності (неоднорідності) поверхні** призводить до істотної зміни активності наноутворень на неоднорідній поверхні каталізатора. Вельми суттєвими є **ефекти структури поверхні та форми нанокристала**. Слід зазначити, що нанорозмірний ефект може виявлятися порізному, залежно від **функції розподілу наночастинок за розмірами**.

Ефект носія для певних каталізаторів, імовірно, є визначальним. На прикладі багатьох каталітичних систем доведено, що зміна носія істотно впливає на каталітичні властивості наноматеріалу. На жаль, у більшості випадків такий ефект лише констатується, а свого остаточного пояснення він ще не має. Слід розрізняти ефект носія, зумовлений **взаємодією наночастинок — носій**, і ефект носія, спричинений особливостями формування наноструктур на його поверхні в процесі синтезу каталізатора. **Ефект залежності енергії адсорбції/акти-**

вації від розміру наночастинок, який у свою чергу залежить від носія, є сьогодні одним із найприйнятніших пояснень появи каталітичної активності нанорозмірного золота, однак слід зазначити, що такий ефект потребує свого теоретичного обґрунтування. **Вплив реакційного середовища на властивості наночастинок** є одним із найменш досліджених нанорозмірних ефектів у нанокаталізі, що зумовлено значною складністю експериментального дослідження перебігу гетерогенно-каталітичного процесу *in situ* на нанорозмірному масштабі. Зниження швидкості реакцій окиснення зі зменшенням розміру наночастинок на поверхні носія може бути спричинене збільшенням енергії адсорбції компонентів реакційного середовища, як реагентів, так і продуктів реакції. Наслідком нанорозмірного ефекту може бути запобігання побічним або небажаним реакціям. Прикладом прояву такого ефекту є те, що науглецювання каталізатора парової конверсії метану спостерігається для наночастинок активного компонента каталізатора (нікелю) розміром понад 7 нм.

Хімічний склад поверхні є визначальним у нанокаталізі. Незначні зміни хімічного складу поверхні можуть призводити до кардинальних змін каталітичної активності нанокаталізаторів. **Ефект хімічного складу поверхні** може залежати як від умов приготування каталізатора, так і від складу реакційного середовища. Ефект хімічного складу поверхні зумовлений впливом адсорбованих атомів або молекул, які не є складовими стехіометрії хімічної реакції, на швидкість перебігу гетерогенно-каталітичного процесу. Така адсорбція може спричинювати як активацію, так і дезактивацію каталізатора. Окремо слід виділити **ефект домішок до наночастинок**, який аналогічний ефекту хімічного складу поверхні. Виявлено, що наявність незначної кількості атомів срібла в наночастиці золота суттєво впливає на її каталітичні властивості. Скоріш за все, ефекти хімічного складу поверхні та ефекти домішок самі по собі не визначають появу каталітичної активності наночастинок, проте вони вказують на можливі

причини невідтворюваності експериментальних результатів.

Ефект заряду наночастинок, до якого слід віднести також ефект диференційної підзарядки за рахунок взаємодії наночастинок — носій, може якісно змінити каталітичні властивості нанокаталізатора. Доведено, що залежно від заряду нанокластера золота енергія адсорбції монооксиду вуглецю, яка зумовлює його каталітичну активність, може як зменшуватися, так і збільшуватися зі зміною кількості атомів золота в такому нанокластері.

Аналіз властивостей наночастинок металів та їх оксидів доводить, що наночастинкам розміром менш як 10 нм притаманна сильна розмірна залежність температури плавлення та теплоємності. Можна припустити, що плавлення

Нанорозмірні ефекти, що спостерігаються в гетерогенно-каталітичних процесах

Геометричні ефекти	Ефект загальної поверхні Ефект збільшення кількості поверхневих атомів Ефект збільшення кількості дефектів Ефект зміни кількості низькокоординуваних атомів Каталіз на межі (по периметру) наночастинок Ефект фрактальності (неоднорідності) поверхні Ефект функції розподілу наночастинок за розмірами Ефект структури поверхні Ефект форми нанокристала
Електронні ефекти	Квантово-розмірний ефект Залежність енергії адсорбції/активації від розміру Ефект реакційного середовища Взаємодія наночастинок — носій Хімічний склад поверхні Ефект домішок Ефект заряду наночастинок
Інші ефекти	Поява хімічно індукваного струму Фазовий перехід наночастинок — рідина Особливості хімічного механізму/кінетики

наночастинок або різка зміна їх теплоємності призводить до збільшення їх каталітичної активності саме в діапазоні 1–10 нм, що зумовлює **ефект фазового переходу наночастинка – рідина**. На жаль, такому аспекту в нанокаталізі поки що практично не приділяють уваги.

Перехід каталізатора в нанорозмірний стан може спричинити зміни не лише швидкості перебігу гетерогенно-каталітичного процесу, а й механізму перебігу хімічних реакцій. Це ілюструє **ефект особливостей хімічного механізму/кінетики**, який було продемонстровано на прикладі реакції окиснення монооксиду вуглецю киснем на нанорозмірному золоті. Нанорозмірні ефекти в каталізі можуть спричинювати нові ефекти, цікавим прикладом яких є поява **хімічно індукваного струму**, що було виявлено в процесі каталізу наночастинами платини, нанесеними на діоксид титану.

Розглянуті нанорозмірні ефекти в нанокаталізі наведено в таблиці. Кожен з цих ефектів або їх комбінації дають підґрунтя для пояснення немонотонної залежності каталітичної активності наноматеріалів від їх розміру. Однак усі ці ефекти фактично знайдено експериментально, але досі ще не пояснено.

Нанореактори

Нанореактори — це хімічні реактори, геометричні параметри яких знаходяться у нанодіапазоні. Сьогодні нанореактори створюють на основі нанопористих матеріалів із застосуванням сучасних нанотехнологій. Ідея використання нанореакторів ґрунтується на тому, що реагенти надходять у простір нанореактора, де реагують на активних центрах, проте залишити нанореактор можуть лише цільові продукти. Наприклад, отримання рідких вуглеводнів (синтетичної нафти) із синтез-газу найефективніше відбувається в нанореакторах розміром 12 нм. Перебіг гетерогенно-каталітичного процесу з використанням нанореакторів певною мірою зумовлений процесами масообміну, які сьогодні, на жаль, на нанорівні вивчено недостатньо.

З метою дослідження явищ масопереносу на нано- та макрорівні вперше запропоновано використання методу п'єзокварцового мікрозважування для вивчення масообмінних властивостей нанокаталізаторів, а також встановлено зв'язок між швидкістю масообміну вихідних реагентів та активністю каталізаторів у процесах етерифікації. Це заклало основу для розроблення нового каталізатора синтезу етил-трет-бутилового ефіру, який за своїми характеристиками перевершує промисловий. Такі дослідження довели, що ефективні коефіцієнти дифузії на нано- та макрорівні можуть відрізнятися більш ніж на десять порядків, що свідчить про необхідність глибокого теоретичного аналізу явищ масопереносу на нанометровому масштабі.

Обмеження реакційного простору в нанореакторах до нанометрового діапазону створює унікальні можливості для реалізації нових каталітичних процесів, які дозволяють отримувати цільові продукти в одну стадію замість кількох, що було продемонстровано на прикладі синтезу оцтової кислоти. Сучасну технологію виробництва оцтової кислоти засновано на тристадійному процесі. На кожній стадії процес відбувається в окремому реакторі: 1) парова конверсія метану з отриманням синтез-газу; 2) синтез метанолу із синтез-газу; 3) карбонілування метанолу. Використання нанореактора розміром 7 нм дає змогу отримувати оцтову кислоту в одну стадію з простих речовин — CO, CH₄ та O₂. Зменшення розміру нанореактора призводить до переважного утворення сажі внаслідок прискорення процесів вуглецеутворення, а збільшення розмірів нанореактора — до повного окиснення вихідних вуглецевмісних реагентів до CO₂.

Використання нанореакторів є дуже перспективним як для створення нових гетерогенно-каталітичних процесів, так і для підвищення ефективності традиційних каталітичних технологій. Однак слід зазначити, що за винятком окремих суто фундаментальних результатів значного прогресу в такому перспективному напрямі нанокаталізу ще не досягнуто.

Аспекти практичного використання нанорозмірного ефекту

Контролювання нанорозмірних характеристик каталізаторів відкриває унікальні можливості для створення принципово нових каталітичних систем завдяки використанню нанорозмірних ефектів, що в майбутньому матиме велике практичне застосування. Сьогодні відомо лише кілька вдалих прикладів застосування таких нових нанорозмірних каталітичних систем у хімічній індустрії. Серед усіх промислових каталізаторів найважливішими є платиновмісні системи. Зменшення кількості платини в каталізаторі за умови незмінності каталітичних властивостей матеріалу є вельми перспективним застосуванням нанорозмірного ефекту. Збільшення селективності нанофазних оксидних каталізаторів до майже 100% вже продемонстровано для промислового гетерогенно-каталітичного процесу дегідрування циклогексанолу до циклогексанону, що є однією зі стадій отримання капролактаму.

Удосконалення та здешевлення наявних каталізаторів є важливим, однак не головним завданням практичного застосування нанокаталізу. Великі надії покладають на відкриття нових гетерогенно-каталітичних процесів, зокрема для вирішення енергетичних проблем. Це стає особливо актуальним у зв'язку зі стрімким скороченням запасів невідновлюваних енергоресурсів (газу, нафти, вугілля), а також з огляду на різке підвищення вимог до екології навколишнього середовища. Отже, сьогодні надзвичайно важливою є проблема переходу на нові екологічно прийнятні та відновлювані джерела енергії. Серед них одним із найперспективніших енергоносіїв є водень — високоенергетичне та практично екологічно стерильне паливо.

Традиційні промислові процеси одержання водню є матеріало- та енергомісткими і, як наслідок, досить затратними. Сучасних обсягів виробництва водню недостатньо, щоб забезпечити перехід на водневе паливо. Необхідні суттєве поліпшення наявних та розроблення нових, більш досконалих методів отримання

водню, серед яких провідна роль належить гетерогенно-каталітичним технологіям, таким як паровий риформінг біоетанолу. Така вихідна сировина для одержання водню має серед інших одну, найбільшу перевагу — її одержують із біомаси, зокрема із сільськогосподарських відходів, продуктів лісопереробки тощо, тобто вона є відновлюваною сировиною, на відміну від вуглеводневої сировини чи метанолу. Реалізація процесу парового риформінгу дає змогу виключити з технологічного циклу стадію дистиляції вихідних реагентів. Крім того, процес не призводить до підвищення вмісту CO_2 в атмосфері, оскільки CO_2 , який продукується в процесі риформінгу, в свою чергу утилізується в процесі росту біомаси.

На відміну від метану — основної сировини для промислового одержання водню використання більш реакційноздатних оксигенатів знижує енерговитратність процесу. Саме застосування нанокаталізаторів дозволило сьогодні реалізувати процес парового риформінгу біоетанолу для отримання водню за 100%-ї ефективності. Важливим для водневої енергетики є одержання водню високої чистоти з метою його використання в низькотемпературних паливних елементах, які отрууються незначни-

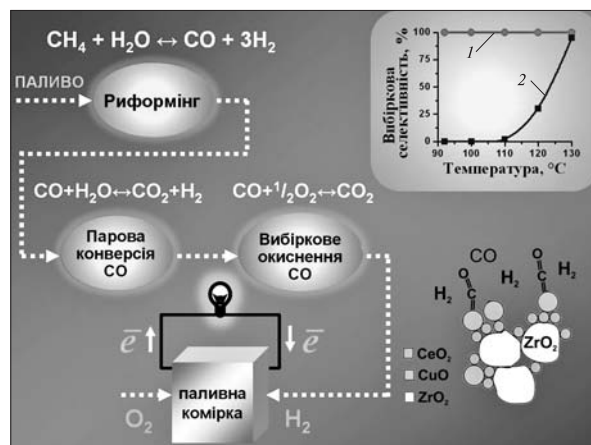


Рис. 3. Отримання та очищення водню для низькотемпературних паливних елементів. Крива 1 ілюструє залежність вибіркової селективності окиснення CO для нанокаталізатора, а крива 2 — для типового масивного каталізатора

ми домішками монооксиду вуглецю. Очищення водню від CO до 10 ppm проводять окисненням CO киснем таким чином, що водень не реагує з киснем. Конструювання найбільш ефективного каталізатора такого процесу засноване на використанні таких нанорозмірних ефектів, як ефект носія, реакційного середовища та залежності енергії адсорбції реагентів від розміру наночастинок для складного трикомпонентного каталізатора, до складу якого входять оксиди міді, церію та цирконію. Такий нанокаталізатор значно перевершує за своїми показниками інші аналоги та забезпечує тонке очищення водню від CO вже за достатньо низьких температур.

Важливі аспекти промислового використання нанорозмірного ефекту в каталізі розвиваються в Інституті фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України під керівництвом члена-кореспондента НАН України С.М. Орлик. Роботи очолюваної нею групи спрямовано на створення нанокompatитних каталізаторів процесів знешкодження оксидів азоту та процесу глибокого окиснення метану. Знання про структурну чутливість реакції глибокого окиснення метану застосовувалися під час розроблення ефективних каталізаторів цього процесу: алюмомарганцевих, модифікованих рідкісноземельними (La) і лужноземельними (Ba, Sr) елементами; масивних і нанесених нанорозмірних феритів зі структурою шпінелі $Me^{II}Fe^{III}_2O_4$ (Me – Mn, Co, Ni), у тому числі модифікованих ПАР. Виявлено фазовий розмірний ефект у процесі високотемпературного оброблення алюмомарганцевих каталізаторів (900 °C, 5 год), що полягає у зниженні температури фазових перетворень оксиду алюмінію при зменшенні розміру його частинок, – утворення метастабільної θ -фази в більш дисперсному носії $\gamma-Al_2O_3$ (L = 4 nm). Встановлено вплив розмірного фактора на швидкість реакції глибокого окиснення метану за відносно низьких температур (до 450 °C), що полягає у збільшенні питомої каталітичної активності феритів кобальту й нікелю при зменшенні розміру їх частинок. На основі цирконій- і алюмооксидних систем з комплексом заданих фізико-

хімічних характеристик (структурні, розмірні, редокс- та кислотні) розроблено каталізатори на основі керамічних блокових матриць стільникової структури із синтетичного кордієриту та каоліно-аеросилогелю, які за активністю не поступаються зарубіжним аналогам і можуть бути застосовані в системах каталітичного очищення газів від домішок вуглеводнів (метану та гомологів C_2-C_4), а також для спалювання вуглеводневого палива у промислових та побутових каталітичних теплогенераторах.

Деякі завдання нанокаталізу

Аналіз сучасного етапу розвитку нанокаталізу доводить, що сьогодні багато проблем залишаються невирішеними. Дослідження останніх років фактично продемонстрували прояви нанорозмірного ефекту в каталізі та висвітлили можливі причини появи таких ефектів. Головний прогрес у розумінні нанокаталітичних ефектів ґрунтується на результатах дослідження впливу суто геометричного фактора на каталітичну активність наноматеріалів для наночастинок металів та їх оксидів. Однак нанорозмірні ефекти, пов'язані з впливом електронного фактора, ще далекі від їх остаточного розуміння. Саме тому основною фундаментальною проблемою сучасного нанокаталізу є розроблення теоретичних уявлень, які зможуть пояснити появу каталітичної активності наночастинок. У свою чергу, спроби вирішення такого завдання вже сьогодні виявили необхідність пошуку теоретичних пояснень таких нанорозмірних ефектів, як ефект носія, ефект заряду наночастинок, взаємодія між наночастинками, ефект домішкових атомів, які впливають на енергетичний стан активного центру нанокаталізатора. Крім електронних та геометричних уявлень стосовно впливу розміру наночастинок каталізаторів на їх каталітичні властивості всебічного дослідження потребують такі явища, як аномальний масоперенос, мобільність адсорбату на поверхні наночастинок, неізотермічність, а також вплив суто фізичних явищ, індукованих перебігом хімічної реакції (динамічні

ефекти, взаємодія з електромагнітними хвилями тощо).

Разом із необхідністю подальшого розвитку теоретичних основ найактуальнішим завданням нанокаталізу є пошук нових гетерогенно-каталітичних реакцій. Такі реакції дадуть змогу провести складний багатостадійний процес в одну стадію або відкрити шлях для отримання корисних речовин за більш м'яких умов (тиск, температура). Прикладом таких процесів є пряме отримання пероксиду водню з водню та кисню, а також одностадійний процес отримання етанолу з монооксиду вуглецю та водню. Не можна виключати також можливість заміни в деяких процесах органічних розчинників на воду, що істотно підвищить як економічні, так і екологічні показники таких процесів. Вирішення подібних завдань може ґрунтуватися лише на поглибленому розумінні впливу нанорозмірного фактора на активність і селективність нанокаталізаторів. Розуміння нанорозмірних ефектів у нанокаталізі дозволить розробити стратегії створення нових каталітичних систем, зокрема контролю селективності та стереоселективності, конструювання нанореакторів, стабільності та регенерації нанокаталізаторів, створення кислотно-основних нанокаталізаторів та поліфункціональних нанокаталізаторів, багатотоннажних процесів отримання новітніх наноматеріалів, у тому числі вуглецевих, тощо.

Безумовно є також необхідність пошуку нових ефектів у нанокаталізі. Перспективними в цьому плані є дослідження каталітичних властивостей нових наноматеріалів, зокрема нанокомпозитів на основі вуглецевих наноматеріалів, двовимірних матеріалів, наприклад

графену та сульфїду молібдену, а також композитів на їх основі. Нерозкритими ще є каталітичні властивості металоорганічних сіток, наноквазікристалів та нанореакторів.

Висновки

Нанокаталіз відкриває необмежені можливості для створення нових гетерогенно-каталітичних процесів та високоефективних каталізаторів нового покоління. Дослідження, спрямовані на синтез нових наноматеріалів, удосконалення сучасних методів їх дослідження, математичного моделювання та квантово-хімічного аналізу, дозволять створити каталітичні системи, в яких структурні та розмірні характеристики можна регулювати на нанорівні. Такі дослідження забезпечать перехід від напівемпіричних методів створення каталізаторів до їх цілеспрямованого конструювання, яке дасть змогу отримувати просторово організовані наноструктури, що мають контрольовані функціональні властивості, такі як висока продуктивність, селективність, термін експлуатації.

Враховуючи постійне посилення вимог екологічної безпеки, саме такі високотехнологічні матеріали дадуть можливість розробити принципово нові конкурентоспроможні гетерогенно-каталітичні процеси: отримання хімічних речовин прямим переробленням відновлюваної сировини та відходів; нові процеси малотоннажної хімії та тонкого органічного синтезу; одержання нових видів моторного палива. Реалізацію таких процесів у промисловості неможливо здійснити без проведення цілеспрямованих фундаментальних досліджень у галузі нанокаталізу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Stroyuk O.L., Kuchmii S.Ya., Kryukov A.I., Pokhodenko V.D.* Semiconductor catalysis and photocatalysis on the nanoscale. — New York: Nova Science Publishers, Inc., 2010. — 183 p.
2. *Крюков А.И., Стрююк А.Л., Кучмий С.Я., Походенко В.Д.* Нанофотокатализ. — К.: Академперіодика, 2013. — 618 с.
3. *Стрижак П.Е.* Наноразмерные эффекты в гетерогенном катализе // Теоретическая и экспериментальная химия. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 1—19.

П.Е. Стрижак

Институт физической химии им. Л.В. Писаржевского НАН Украины
пр. Науки, 31, Киев, 03028, Украина

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАНОКАТАЛИЗА

Рассмотрены основные проблемы нанокатализа — области физической химии, которая стремительно развивается в последние десятилетия. Проанализированы проявления наноразмерного эффекта в катализе. Освещены основные подходы создания новых гетерогенно-каталитических процессов и катализаторов на основе современных наноматериалов, в частности наночастиц переходных и благородных металлов, различных оксидных наносистем, нанопористых материалов, двумерных наносистем. Сформулированы направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: катализ, нанокатализ, катализатор, наноматериалы.

P.E. Strizhak

Pisarzhevsky Institute of Physical Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
31 Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine

CURRENT PROBLEMS OF NANOCATALYSIS

We consider the main problems of nanocatalysis, which is a branch of physical chemistry that is rapidly developing during last decades. The main consequences of nanosize effect for catalysis are discussed. We also highlight the main approaches for developing new heterogeneous catalytic chemical processes and catalysts based on modern nanomaterials, particularly, metal nanoparticles, various oxide nanosystems, nanoporous materials, and two-dimensional nanosystems. The main directions of further studies are discussed.

Keywords: catalysis, nanocatalysis, catalyst, nanomaterials.