



КОЛОТІЛОВ

Сергій Володимирович — член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України

МЕТАЛООРГАНІЧНІ КАРКАСНІ СПОЛУКИ: ЯКИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПОБАЧИВ У НИХ НОБЕЛІВСЬКИЙ КОМІТЕТ

Нобелівська премія з хімії 2025 року

Цьогоріч лауреатами Нобелівської премії з хімії стали троє вчених — японський професор Сусуму Кітагава (Susumu Kitagawa) з Інституту інтегрованих клітинно-матеріальних наук (iCeMS) Кіотського університету, британець Річард Робсон (Richard Robson) з Мельбурнського університету та американець Омар Ягі (Omar M. Yaghi) з Каліфорнійського університету в Берклі — за «розроблення металоорганічних каркасних структур». Як зазначено у пресрелізі Нобелівського комітету, дослідники використали створені ними металоорганічні каркаси для вирішення багатьох нагальних для людства проблем: збирання води з пустельного повітря, вилучення забруднюючих речовин з води, захоплення вуглекислого газу, зберігання водню тощо.

Ключові слова: Нобелівська премія з хімії 2025 року, Сусуму Кітагава, Річард Робсон, Омар Ягі, металоорганічні каркасні структури.

8 жовтня 2025 р. Шведська королівська академія наук назвала імена лауреатів Нобелівської премії з хімії. Цього року її присуджено Сусуму Кітагаві, Річарду Робсону та Омару Ягі за розроблення металоорганічних каркасних сполук (metal-organic frameworks — MOF, або українською — МОК). У цій статті ми спробуємо розібратися, що це за сполуки, які особливості вони мають і чому їх розробників було відзначено найпрестижнішою у світі науковою нагородою.

Металоорганічні каркасні структури — це хімічні сполуки, одержані зв'язуванням окремих іонів металів або поліядерних фрагментів (частинка, що містить два і більше іонів металів) органічними «містковими» молекулами або іонами. Такі складові часто називають будівельними блоками, хоча цей термін, як і інші поняття в кожній новітній галузі досліджень, ще не має однозначного визначення.

Металовмісні будівельні блоки можуть існувати у складі окремих (дискретних) сполук (наприклад, фрагмент $\text{Fe}_3\text{O}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_6^+$, що входить до складу МОК, існує в сполуці



Фото: Kyoto University iCeMS

Сусуму Кітагава (Susumu Kitagawa) — японський хімік, спеціалізується на органічно-неорганічних гібридних сполуках, фізико-хімічних властивостях пористих координаційних полімерів, зокрема металоорганічних каркасних структур.

Сусуму Кітагава народився 4 липня 1951 р. в Кіото. Навчався в Кіотському університеті, де в 1979 р. здобув ступінь PhD з вуглеводневої хімії, працював асистентом професора, а потім доцентом в Університеті Кіндай. У 1992 р. він став професором неорганічної хімії в Токійському столичному університеті (TMU). Мав постдокторську стипендію в Техаському університеті А&М, де працював під керівництвом відомого професора хімії Френка Альберта Коттона (1986—1987), був запрошеним професором у Міському університеті Нью-Йорка (1996). У 1998 р. повернувся до Кіотського університету як професор неорганічної функціональної хімії. У 2007 р. став одним із співзасновників Інституту інтегрованих клітинно-матеріальних наук (iCeMS) при цьому університеті, де спочатку обіймав посаду заступника директора, а в 2013—2023 рр. очолював iCeMS. У 2018 р. отримав почесний докторський ступінь Технічного університету Мюнхена. У 2011—2023 рр. був асоційованим членом Наукової ради Японії. На сьогодні Сусуму Кітагава є почесним професором і виконавчим віцепрезидентом з просування досліджень у Кіотському університеті.

Сусуму Кітагава — член Японської академії наук (2019), Лондонського королівського товариства (2023). Його відзначено багатьма науковими нагородами, зокрема премією Хімічного товариства Японії (2003, 2009), премією Гумбольдта (2008), премією Clarivate Citation Laureates з хімії (2010) — списку ймовірних кандидатів на Нобелівську премію, складеного за показниками цитування, медаллю Пошани з пурпуровою стрічкою (Японія) (2011), премією де Жена (2013), премією Японської академії (2016), медаллю Фреда Басоло (2016), премією Сольве «Хімія для майбутнього» (2017), премією Фудзіхара (2017), гран-прі Fondation de la Maison de la Chimie (2019).

$[\text{Fe}_3\text{O}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_6(\text{H}_2\text{O})_3](\text{CH}_3\text{CO}_2)_3$), але можуть формуватися і безпосередньо в процесі утворення МОК.

Слід зазначити, що і сам термін МОК також суперечить прийнятим вимогам хімічної номенклатури, адже традиційно до металоорганічних сполук відносили сполуки, що мають хімічний зв'язок металу з атомом вуглецю. Переважна більшість описаних МОК не містять таких зв'язків. Це типові комплексні сполуки, в яких іони металів з'єднано з атомами кисню, азоту, сірки, фосфору тощо. Термін МОК підкреслює, що сполука нагадує каркасну конструкцію та містить як іони металу, так і органічні ліганди. Часто використовують ще термін «пористі координаційні полімери», який, якщо не зважати на акценти окремих дослідників, є синонімом МОК.

Принциповою відмінністю МОК від координаційних сполук інших класів є наявність пор, здатних поглинати (адсорбувати чи абсорбувати) інші речовини. Розмір таких пор має бути зіставним з розміром молекул, що сорбуються. Наприклад, пори розміром більш як 50 нм є настільки великими, що взагалі не сприймаються «молекулами-гостями» як пори. Більшість МОК мають пори діаметром від 0,5 до 10 нм. Для ілюстрації масштабу можна сказати, що в порі діаметром 1 нм «від стінки до стінки» може розміститися ланцюжок приблизно з 7 молекул води. Лише в разі такого розміру пор проявляються особливості, які й стали підґрунтям для виділення МОК в окремий клас хімічних сполук.

За усталеною традицією назву новому МОК дають дослідники, які його відкрили. Часто, але не обов'язково, така назва складається з аббревіатури, що позначає наукову установу, де одержано МОК, та номеру спроби, яка виявилася вдалою (дещо рідше номер відповідає кількості МОК, синтезованих цією групою дослідників). Наприклад, назва однієї з найбільш відомих сполук HKUST-1 походить від Hong Kong University of Science and Technology, назва серії сполук MIL-53 — від Matériaux de l'Institut Lavoisier, а назва серії сполук MOF є аббревіатурою від metal-organic framework.

Металоорганічні каркасні сполуки утворюються при взаємодії солей металів чи моноядерних або поліядерних комплексів з органічними лігандами. Здебільшого такі органічні ліганди мають жорстку, негнучку будову. Кожен будівельний блок може утворювати зв'язки у певних напрямках, наприклад по прямій лінії під кутом 180° або в площині під кутом 120° , або в напрямках, що задаються векторами, спрямованими від центра тетраедра до його вершин, тощо. Поєднання будівельних блоків різної будови, як складових дитячого конструктора, дозволяє отримувати величезне розмаїття так званих аркових архітектур — тривимірних (3D), двовимірних (2D) та одновимірних (1D). У випадку 2D- та 1D-структур формування пор часто залежить від взаємного розташування окремих 2D-сіток або лінійних полімерів у твердому тілі. Слід зазначити, що деякі дослідники не відносять пористі 2D- та 1D-координаційні полімери до класу МОК, хоча вони мають багато подібних властивостей.

Крім того, властивості, досить подібні до МОК, мають і координаційні сполуки супрамолекулярної будови з порожнинами в кристалічних ґратках. Принциповою відмінністю МОК від пористих супрамолекулярних систем є те, що структурні елементи МОК поєднані «звичайними» ковалентними зв'язками, тоді як складові супрамолекулярних систем утримуються у своїх позиціях завдяки більш слабким водневим зв'язкам.

Уперше МОК отримав Річард Робсон у 1989 р. [1]. Його піонерська робота в цій галузі починається словами: «Ми пропонуємо створити новий, потенційно широкий клас твердих полімерних матеріалів з безпрецедентними і, можливо, корисними властивостями шляхом зв'язування центрів з тетраедричним або октаедричним розташуванням вільних валентностей за допомогою стрижнеподібних з'єднувальних елементів». Як будівельні блоки для свого першого МОК Робсон використав тетрагональні молекули тетракіс(4-ціанофеніл)-метану та іони міді (I), завдяки чому утворився 3D-каркас з порожнинами (рис. 1). Оскільки

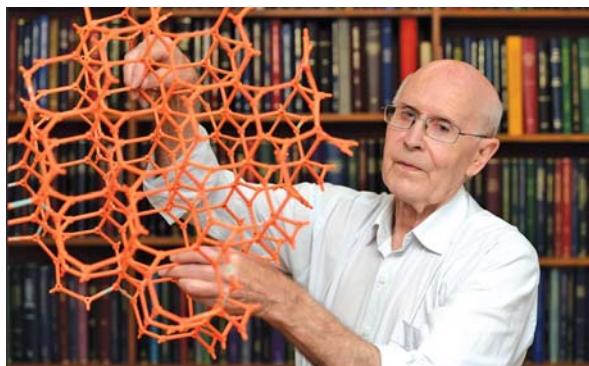


Фото: Paul Burston/University of Melbourne

Річард Робсон (Richard Robson) —

британсько-австралійський хімік, професор хімії в Мельбурнському університеті, піонер у галузі координаційних полімерів, зокрема металоорганічних каркасів.

Народився 4 червня 1937 р. у м. Глусберн (Велика Британія). Навчався в Брейсноуз-коледжі при Оксфордському університеті, де у 1959 р. здобув ступінь бакалавра, а в 1962 р. — ступінь PhD. Своє докторське дослідження, присвячене фотохімії органічних молекул, виконував під керівництвом Джона А. Барлтропа в лабораторії Дайсона Перрінса Оксфордського університету. У 1962—1964 рр. як постдок працював у Каліфорнійському технологічному інституті, а в 1964—1965 рр. — у Стенфордському університеті під керівництвом майбутнього нобелівського лауреата Генрі Таубе (Нобелівська премія з хімії 1983 р.). Потім, у 1966 р., перейшов на роботу до Мельбурнського університету, де й залишався до кінця своєї кар'єри (вийшов на пенсію в 2004 р.).

У 1974 р. Річарда Робсона попросили створити великі моделі кристалічних молекул з дерев'яних кульок і стрижнів для лекцій з хімії на першому курсі. Під час роботи його вразило, як кристалічна структура молекул визначалася розташуванням отворів на кульках, що представляли атоми. Як він пізніше згадував: «Це навело мене на думку: «А що, якби замість кульок використати молекули, а замість стрижнів — хімічні зв'язки?». На початку 1990-х років він створив новий клас координаційних полімерів, що й заклало основу сучасної галузі металоорганічних каркасів. Його новаторський підхід ґрунтувався на поєднанні іонів міді (I) зі спеціально розробленою органічною тетрагональною молекулою, що сприяло утворенню тетраедричної геометрії. Цей метод дозволив синтезувати кристалічні каркаси з алмазоподібною структурою, але з великим порожнім простором усередині каркаса.

Річард Робсон — член Австралійської академії наук (2000), Лондонського королівського товариства (2022), лауреат премії Берроуза від неорганічного відділу Королівського австралійського хімічного інституту (1998).



Фото: Brittany Hosea-Small for UC Berkeley

Омар Ягі (Omar Mwannees Yaghi) —

американський хімік-органік палестинського походження, відомий своїми новаторськими роботами в галузі ретикулярної хімії.

Народився 9 лютого 1965 р. в Аммані (Йорданія) у родині палестинських біженців, які втекли з Мамсії під час арабо-ізраїльської війни 1948 р. У віці 15 років переїхав до США, вступив у коледж. У 1985 р. закінчив Університет штату Нью-Йорк в Олбані зі ступенем бакалавра з хімії, у 1990 р. здобув ступінь PhD в Університеті Іллінойсу в Урбана-Шампейн. З 1990 по 1992 р. як постдок працював у Гарвардському університеті під керівництвом Річарда Г. Холма, потім був доцентом в Університеті штату Аризона (1992—1998), професором хімії в Мічиганському університеті (1999—2006), професором хімії в Каліфорнійському університеті в Лос-Анджелесі (2007—2012). З 2012 р. він є професором хімії в Каліфорнійському університеті в Берклі, а з 2014 р. — директором-засновником Інституту глобальної науки Берклі, метою якого є наставництво вчених у всьому світі та сприяння більш потужній глобальній науковій культурі.

У 2005 р. Омар Ягі разом з колегами синтезував ковалентні органічні каркаси (КОК), які, як і МОК, мають велику площу поверхні і широкий спектр властивостей. У 2020 р. заснував компанію Atoco, яка використовує металоорганічні фільтри для уловлювання CO₂ та збирання води з повітря.

Омар Ягі — член Національної академії наук США (2019), Німецької національної академії наук Леопольдіна (2023); має численні нагороди, зокрема Премію сторіччя від Королівського хімічного товариства (2010), премію Clarivate Citation Laureates (2010) — списку ймовірних кандидатів на Нобелівську премію, складеного за показниками цитування, Міжнародну премію короля Фейсала (2015), премію Альберта Ейнштейна (2017), премію Вольфа (2018), медаль Вільгельма Екснера (2023), премію Бальцана (2024) та ін.

МОК є кристалічними речовинами, їхню будову в переважній більшості випадків однозначно було встановлено методом рентгеноструктурного аналізу. Завдяки кристалічності і впорядкованості МОК мають пори практично однакового розміру, які доступні для «молекул-гостей» уздовж усього кристала (звичайно, якщо такі пори не заповнені розчинником або іншими речовинами, захопленими з реакційної суміші в процесі формування МОК).

Підхід Річарда Робсона надалі розвинув Омар Ягі, який одержав ряди МОК, що мають негнучкі ґратки. Серед перших робіт О. Ягі особливо виділяється дослідження серії МОК кубічної топології, побудованих з'єднаннями тетраедерних фрагментів Zn₄O з аніонами ароматичних дикарбоксилатів з утворенням 3D-сіток кубічної топології (рис. 2) [2]. Ці сполуки утворюються при взаємодії солей цинку (II), наприклад Zn(NO₃)₂, з ароматичними дикарбоновими кислотами в присутності органічних основ, потрібних для депротонування карбоксильних груп. Тетраедерні фрагменти Zn₄O формуються безпосередньо в реакційній суміші під час утворення МОК.

При ознайомленні з МОК часто виникає питання: чому формується саме пориста структура, а не утворюється щільна упаковка без порожнин? Найчастіше пориста структура утворюється, як це не дивно, через те, що інший варіант просто не може реалізуватися за умови, що всі донорні атоми ліганду зв'язуються з іонами металу і всі вакансії в координаційній сфері металу будуть зайняті донорними атомами лігандів. Наприклад, не можна одержати непористу структуру при з'єднанні іонів міді (I) з тетракіс(4-ціанофеніл)метаном, якщо всі донорні атоми лігандів зв'язуються з іонами міді і всі валентності іонів міді будуть насичені донорними атомами лігандів (див. МОК Р. Робсона на рис. 1).

Надзвичайно важливу роль відіграє вибір умов синтезу. Оскільки при взаємодії реагентів у розчині утворюються нерозчинні тверді МОК, помилка під час формування полімерної сітки (така як «пропуск» органічного ліганду, деформація й утворення хімічного зв'язку

в неправильному напрямку) назавжди залишиться у вигляді дефекту. Для досягнення високих сорбційних характеристик і взагалі для формування кристалів, придатних для рентгеноструктурного аналізу, формування МОК має відбуватися достатньо повільно.

Важливе значення має також вибір розчинника, молекули якого, як правило, заповнюють пори і в такий спосіб утримують у певній орієнтації будівельні блоки в процесі росту полімерної сітки МОК, що сприяє її формуванню без дефектів. У деяких випадках формування МОК здійснюють у присутності спеціально підібраних сполук, молекули яких відіграють роль темплатів — вони заповнюють пори і спрямовують ріст полімерної сітки. Для подальшого використання МОК ці темплати потрібно потім видалити з пор, оскільки вони вже виконали своє завдання — допомогли сформувати пористу полімерну сітку. Звичайно, перед використанням МОК з пор слід видалити й захоплені молекули розчинника, які здебільшого утримуються досить міцно і перешкоджають доступу інших речовин.

Наразі відомо багато пористих речовин і матеріалів, які широко використовують у техніці, медицині, побуті. Як приклад можна навести добре відоме активоване вугілля, природні та синтетичні цеоліти, силікагель тощо. Унікальною особливістю МОК порівняно з пористими речовинами інших класів є можливість введення до їхнього складу будь-яких, без перебільшення, функціональних груп або використання будь-яких іонів металів, що задаватимуть певні фізичні властивості, такі як здатність до люмінесценції, нетривіальні магнітні властивості тощо.

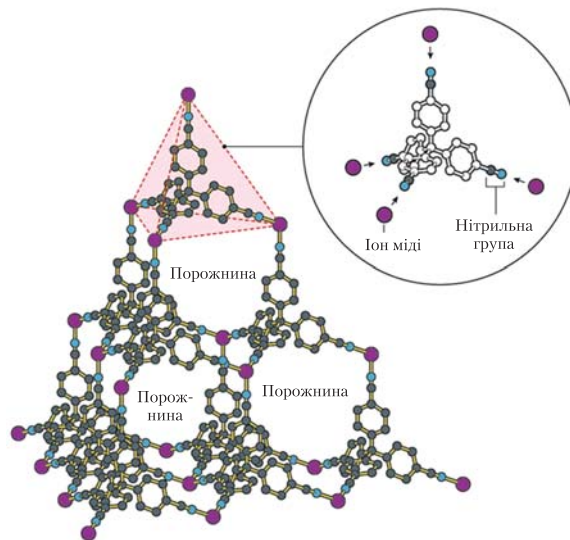


Рис. 1. Металоорганічний каркас, створений Р. Робсоном поєднанням іонів міді (I) з тетракіс(4-ціанофеніл)-метаном. Рисунок адаптовано з ілюстрації, поширеної Нобелівським комітетом (оригінал — © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

вості тощо. З іншого боку, завдяки тому, що стінки між порами в МОК утворено мономолекулярними шарами, в ряду таких сполук можна досягати надзвичайно високої питомої площі поверхні S , що істотно перевищує показники інших сорбентів. Так, теоретична межа S для МОК становить $14600 \text{ м}^2/\text{г}$ [3].

У дослідженнях МОК NU-109 і NU-110, одержаних зв'язуванням тригональних місткових лігандів L1 і L2 іонами міді (II), знайдено, що їхня питома площа поверхні, визначена за експериментальними даними з адсорбції азоту з використанням моделі БЕТ, становить відпо-

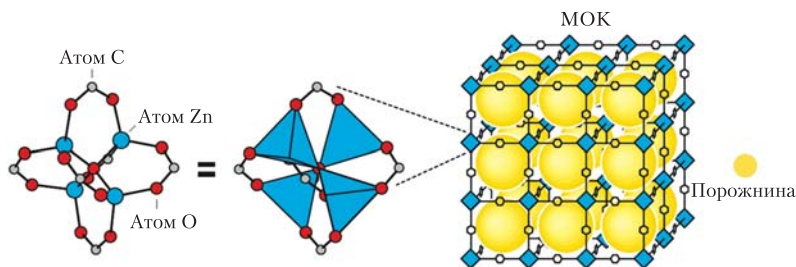


Рис. 2. Створений О. Ягі МОК $[\text{Zn}_4\text{O}(\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2)_3]_n$. Праворуч у 3D-сітці візуалізовано кулі максимального розміру, які можна розмістити в порожнинах з урахуванням мінімально можливих відстаней до атомів МОК. Рисунок адаптовано з ілюстрації, поширеної Нобелівським комітетом (оригінал — © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

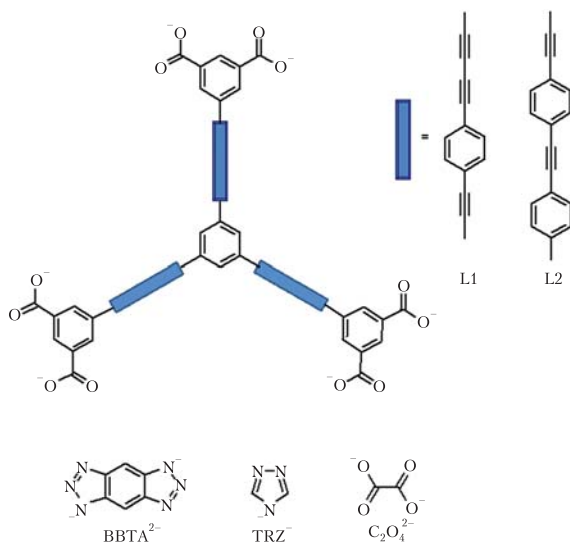


Рис. 3. Формули органічних лігандів, використаних для синтезу МОК NU-109 (L1), NU-110 (L2), Cu₂(BbTA), [Zn₂(TRZ)₂(C₂O₄)]_n

відно 7010 та 7140 м²/г [3]. Товщина стінок міжпорами в таких сполуках фактично дорівнює товщині лінійних ділянок лігандів, доступних для взаємодії з адсорбатами з усіх напрямків, що забезпечує досягнення високої сорбційної ємності матеріалу за мінімальної власної маси.

Завдяки високій площі поверхні МОК розглядають як середовища для зберігання паливних газів, наприклад метану, пропану або водню. Так, заповнення балона МОК [Zn₄O(O₂C–C₆H₄–CO₂)₃]_n (виробляється компанією BASF під назвою BASOCUBE™; –O₂C–C₆H₄–CO₂⁻ = 1,4-бензолдикарбоксилат) дає можливість збільшити кількість пропану, що міститься в такому балоні, втричі порівняно з порожнім контейнером за однакового тиску. Це пояснюється тим, що газ додатково стискується в порах під дією адсорбційних сил. Деякі МОК є перспективними середовищами для зберігання водню, що є особливо складним завданням з огляду на те, що за температури вище 33 К водень є суперкритичним газом і його неможливо перетворити на рідину за будь-якого тиску.

Один із найкращих матеріалів для сорбційного зберігання водню — МОК NU-2100, який має склад Cu₂(BbTA) (де BbTA²⁻ — діаніон

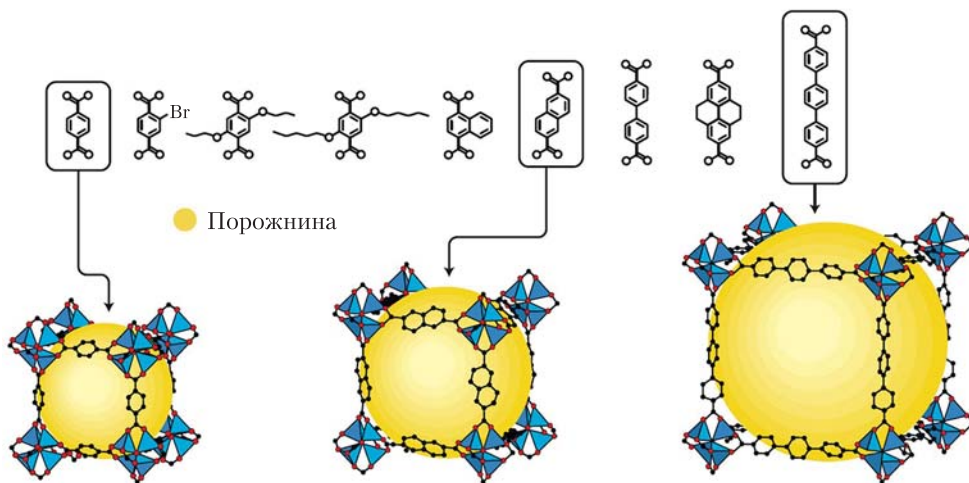
1,5-дигідробензо-біс-триазолу, рис. 3) [4]. Цей сорбент здатен зберігати більш як 10 г/л водню за кімнатної температури (а це дуже нетривіальна властивість) в діапазоні тисків від 5 до 100 бар і характеризується найвищою серед досліджених сорбентів початковою теплою адсорбції водню — 32 кДж/моль. За оцінкою Міністерства енергетики США (Department of Energy), сорбент, придатний для практичного застосування для зберігання водню в транспортних засобах, має забезпечити сорбційну ємність на рівні 30 г/л за тиску 700 бар. Після декількох десятиліть пошуків характеристики NU-2100 дають підстави для оптимізму — можливо, вдасться досягти таких показників.

Особливістю МОК є можливість створення серій сполук подібної будови, що різняться довжиною місткових фрагментів або наявністю функціональних груп. Так, заміною 1,4-бензолдикарбоксилату в [Zn₄O(O₂C–C₆H₄–CO₂)₃]_n на довші аналоги було отримано серію МОК з різними величинами площі поверхні, діаметра та об'єму пор (рис. 4) [2].

Введення замісників до складу лігандів у МОК дає змогу формувати в порах нові центри адсорбції, завдяки чому можна регулювати сорбційні властивості пористого матеріалу. Наприклад, збільшення дипольного моменту місткових молекул у складі МОК або створення вакансій у координаційних сферах іонів металів сприяє підвищенню енергії зв'язування субстратів унаслідок дисперсійних взаємодій; введення основних аміногруп веде до збільшення сорбційної ємності стосовно газів кислоти природи, таких як CO₂ або SO₂, а одним зі шляхів підвищення сорбційної ємності МОК стосовно амінів — забруднювачів повітря птахофабрик — є формування структур із розташованими в порах некоординованими кислотними групами (такими як –SO₃H).

Одним із найбільш перспективних сорбентів для вилучення парникового газу CO₂ з промислових викидів є МОК CALF-20 складу [Zn₂(TRZ)₂(C₂O₄)]_n (де TRZ⁻ = аніон 1,2,4-триазолу, C₄O₄²⁻ — оксалат-іон, рис. 3) [5]. За кімнатної температури і тиску 1,2 бар CALF-20 адсорбує близько 18 мас. % CO₂, і, на відміну

Рис. 4. Ілюстрація збільшення розміру порожнини МОК ряду $\text{Zn}_4\text{O}(\text{O}_2\text{C}-\text{R}-\text{CO}_2)_3$, створених О. Ягі, зі зростанням лінійного розміру дикарбоксилатів. Рисунок адаптовано з ілюстрації, поширеної Нобелівським комітетом (оригінал — © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)



від багатьох інших сорбентів, здатність цього МОК поглинати CO_2 не погіршується навіть за відносної вологості газового потоку 40 %. Зв'язування CO_2 відбувається переважно завдяки дисперсійним взаємодіям, а висока енергія адсорбції (близько 40 кДж/моль при заповненні найбільш високоенергетичного сайту) забезпечується вдалим розташуванням лігандів та іонів металу, що утворюють стінки порожнини. МОК CALF-20 витримує понад 450 тис. циклів адсорбції-десорбції, є стійким до дії NO , NO_2 , SO_2 , і його можна легко синтезувати в багатокілограмових обсягах.

Введенням до складу МОК функціональних груп, що селективно зв'язують іони золота, одержано сорбент JNM-100-AO (рис. 5), який за 15 хв вилучає 95 % іонів золота (III) з морської води за початкової концентрації золота 20 ppb ($2 \cdot 10^{-6}$ мольного %) [6]. Важливо, що іони Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Zr^{4+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Ba^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , Pt^{2+} , Pt^{4+} , Pd^{2+} , Ag^+ не заважають сорбції золота, що є ключовою умовою використання сорбентів для вилучення золота з морської води або стічних рідин промислових підприємств. Адсорбовані іони золота легко змиваються обробкою сорбенту розчином тіосечовини, а сам сорбент при цьому можна використовувати повторно щонайменше 5 разів.

Ще одне унікальне застосування МОК — отримання питної води з повітря в пустелях — ґрунтується на надзвичайно високій селектив-

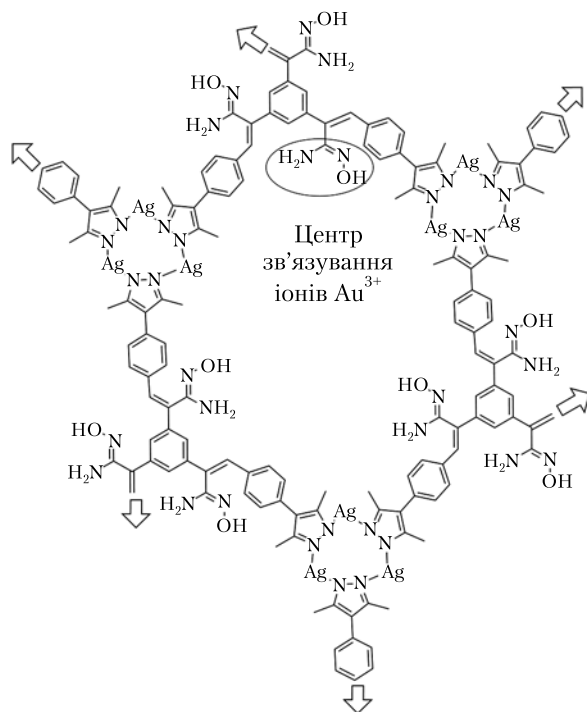


Рис. 5. Будова МОК JNM-100-AO, що характеризується надзвичайно високою ефективністю вилучення золота з розведених рідких відходів або морської води. Стрілками показано напрямки поширення полімерної сітки

ності процесу сорбції води. Схему вилучення води з повітря в пустелях за допомогою МОК наведено на рис. 6.

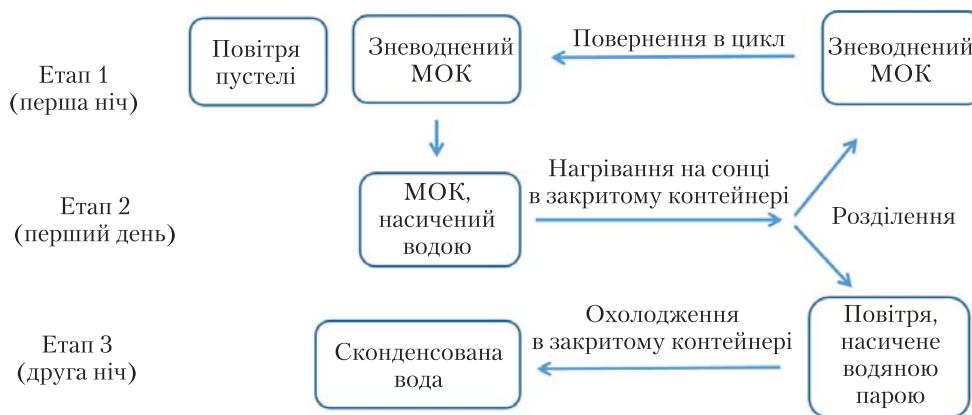


Рис. 6. Принципова схема процесу вилучення води з повітря пустель із використанням МОК

На першому етапі, вночі, коли температура спадає, МОК сорбує воду з повітря. Незважаючи на дуже низький вміст атмосферної вологи, енергія її зв'язування є настільки високою, що центри адсорбції МОК насичуються. Найбільшою ефективністю в процесі вилучення води характеризується МОК **Cr-soc-MOF-1** складу $\text{Cr}_3\text{O}(\text{TCPT})_{1,5}(\text{H}_2\text{O})_2\text{Cl}$, де TCPT^{4-} — 3,3",5,5"-тетракис(4-карбоксифеніл)-*n*-терфеніл. 1 г такого МОК поглинає 1,95 г води, що майже вдвічі більше, ніж власна вага сорбенту [7]. На другому етапі контейнер з МОК закривають і нагрівають на сонці. При цьому МОК віддає воду, і повітря, що містить водяну пару, переходить в окремий контейнер. Перед третім етапом цей контейнер закривають, впродовж другої ночі він охолоджується і вода конденсується. Зневоднений МОК готовий для подальшого використання. Зрозуміло, що процес можна інтенсифікувати, якщо штучно нагрівати і охолоджувати контейнери кілька разів на день.

Деякі функціональні групи у складі лігандів можуть бути кислотними або основними каталітично активними центрами. З іншого боку, в координаційних сферах іонів металів у складі МОК можна створити координаційно ненасичені сайти, в яких можуть зв'язуватися і активуватися молекули органічних сполук. Завдяки таким особливостям будови МОК можуть бути ефективними каталізаторами для широкого спектру органічних реакцій, що відбуваються в гетерогенному режимі, зокрема кислотно-

основних процесів конденсації, ізомеризації, дегідратації, утворення або гідролізу естерів, амідів, нітрilів тощо, а також окисно-відновних процесів, наприклад окиснення під дією кисню повітря пероксидів, епоксидування алкенів, окиснювальної димеризації термінальних алкінів тощо [8]. Перевагами МОК як каталізаторів є висока об'ємна концентрація каталітично активних центрів, їхня доступність, а також можливість прояву розміроселективності завдяки обмеженню доступу субстратів, розмір яких перевищує розмір перерізу пор. На відміну від багатьох інших каталізаторів, тонкий шар МОК можна сформувати («виросити») на носії, розміщеному в хімічному реакторі, — на сітці або гранулах з інертного матеріалу, на металевій або керамічній піні з високорозвиненою поверхнею.

До складу МОК можна вводити функціональні групи, здатні зв'язувати іони металів, уже після формування пористої ґратки МОК, що забезпечує утворення нових каталітично активних центрів. Так, з використанням 4,4'-біпіридиндикарбонової кислоти як місткового ліганду для зв'язування іонів Al^{3+} було одержано МОК MOF-253, що містить некоординовані атоми азоту (рис. 7) [9]. Такі центри відіграють роль лігандів для ковалентного введення іонів інших металів у вже синтезований MOF-253. Після обробки MOF-253 розчином хлориду рутенію отримано пористий каталізатор окиснення первинних спиртів до вторинних спиртів у м'яких умовах, без утворення побічних

продуктів — карбонових кислот. Розмір пор MOF-253 достатньо великий для проведення реакцій за участю спиртів великого розміру, таких як холестерол (похідна холестерину, яку використовують у фармацевтиці). Завдяки можливості введення різних іонів металів і супутніх лігандів МОК з додатковими центрами зв'язування іонів металів можна розглядати як універсальну платформу для проведення різних каталітичних реакцій, у яких каталітичні властивості системи задають вибором такого «додаткового» іону металу.

Іони металів у складі МОК можуть бути редокс-активними і вступати в реакції окиснення або відновлення без руйнування полімерного каркасу. Ще простіше ввести редокс-активні фрагменти до складу органічних лігандів. Одержані при цьому МОК можна застосовувати як електродні покриття для процесів електрокаталізу, зокрема для важливих процесів виділення водню з води, відновлення, окиснення, дегалогенування органічних сполук [10]. Електрохімічні перетворення органічних сполук на електродах, покритих МОК, відбуваються селективно — лише молекули, здатні сорбуватися пористими системами, матимуть шанс вступити в реакцію.

Унікальною перевагою МОК над пористими речовинами інших класів є можливість їх синтезу з використанням чистих ізомерів оптично активних лігандів. При цьому формується пориста речовина, яка містить асиметричні центри в кожній порі, в кожній ланці. Порівняно з матеріалами, отриманими методом іммобілізації оптично активних сполук на поверхні кремнезему або целюлози, у МОК досягається найвища можлива об'ємна концентрація асиметричних центрів. Такі МОК є перспективними носіями для хроматографічного розділення оптичних ізомерів, що має вкрай важливе значення для фармацевтики та агрохімії. Як приклад можна навести ефективне хроматографічне розділення оптичних ізомерів відомого лікарського засобу ібупрофену на колонці, заповненій МОК $[\text{ZnLBr}]_n$, де L^- = аніон N-(4-піридилметил)-L-лейцину, похідної природної амінокислоти L-лейцину [11]. Використання

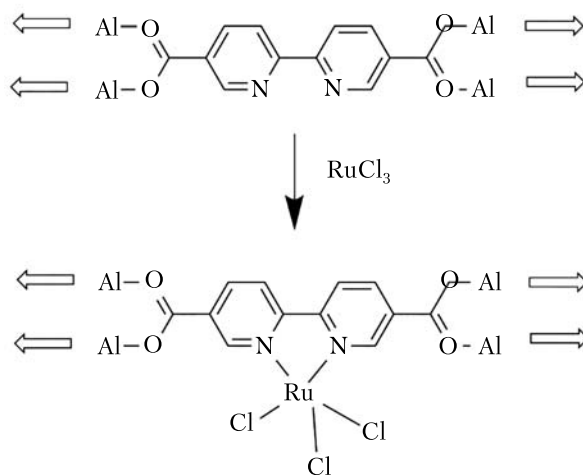


Рис. 7. Будова місткового фрагменту в MOF-253 та утворення нового каталітично активного центру в такому МОК. Стрілками показано напрямки поширення полімерної сітки

природної амінокислоти для синтезу ліганду є запорукою низької вартості такого хірального носія для хроматографії. Слід зазначити, що на колонці з $[\text{ZnLBr}]_n$ вдається розділяти оптичні ізомери молекул, розмір яких не перевищує $9,2 \times 9,4 \text{ \AA}$, що є ознакою того, що розділення енантіомерів відбувається завдяки їх сорбції в порах (на відміну від утримання на поверхні кристалів МОК). Хіральні МОК мають великий потенціал не лише для препаративного розділення оптичних ізомерів органічних сполук, а й для створення аналітичних хроматографічних колонок для швидкого визначення енантіомерів.

Завдяки можливості комбінування різних іонів металів і органічних фрагментів МОК мають великий потенціал для створення сенсорів, які змінюють фізичні властивості (забарвлення, характеристики люмінесценції, магнітну сприйнятливості) при заповненні пор різними речовинами. Наприклад, МОК $[\text{Zn}_3(\text{bpdc})_3(\text{bipy})]_n$, де bpdc^{2-} = 4,4'-дифенілдікарбоксилат, bipy = 4,4'-біпіридин, виявляє яскраву люмінесценцію з максимумом за $\lambda = 425 \text{ нм}$ (рис. 8) [12]. Сорбція нітроароматичних сполук — компонентів вибухівки — при-

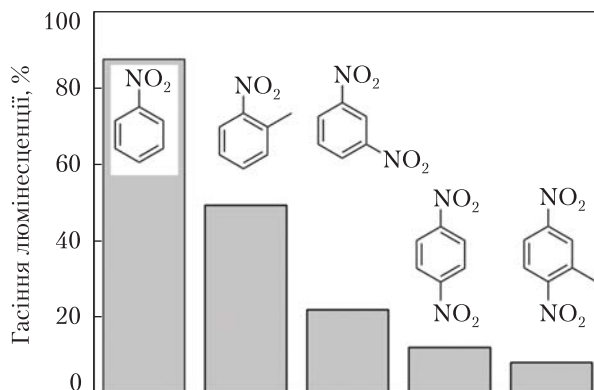


Рис. 8. Зниження інтенсивності люмінесценції МОК $[\text{Zn}_3(\text{bpdc})_3(\text{bipy})]_n$ при адсорбції нітросполук — компонентів вибухівки. Діаграму побудовано за даними роботи [12]

водить до гасіння люмінесценції, що зумовлено переносом енергії зі збудженого стану МОК на найнижчу вільну молекулярну орбіталь адсорбату. На основі цього ефекту можна створювати сенсори для постійного моніторингу повітря у вантажних відсіках потягів, автобусів, у камерах зберігання речей на вокзалах для детектування вибухівки.

Немає перешкод і для створення композитів МОК з іншими матеріалами, наприклад з магнітними або люмінесцентними наночастинками, з каталітично активними наночастинками, що додатково розширює спектр можливих корисних властивостей. Так, МОК широко використовують як носії наночастинок для уникнення їх агрегації і в деяких випадках — для підвищення каталітичної активності через вплив носія на їхню електронну будову. Наприклад, завдяки формуванню наночастинок паладію розміром близько 1,9 нм у порах МОК структурного типу MIL-101 складу $[(\text{Cr}_3(\text{F},\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_2\text{O})[\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2]_3]_n$ одержано каталізатор реакції С–С-сполучення арилборонових кислот і арилхлоридів (реакція Сузукі—Міяури), що забезпечує утворення продуктів з виходами до 100 % у водному розчині [13]. Нетривіальним досягненням є те, що реакція відбувається за участю саме арилхлоридів, які значно менш реакційноздатні, ніж аналогічні арилброміди та арильодиди. Вибір такого МОК

для створення каталізатора зумовлено його високою питомою площею поверхні (4000 m^2/g), що важливо для диспергування наночастинок паладію, великим розміром пор (близько 3 нм), що має істотне значення для вільного доступу субстратів до каталітично активних центрів та виведення продуктів реакції, а також стійкістю цього МОК до гідролізу у воді та до дії різних органічних розчинників, що уможливорює повторне використання каталізатора. Реакцію С–С-сполучення широко застосовують для створення активних речовин лікарських засобів, складових препаратів для захисту рослин, а можливість перебігу такого процесу у водному розчині значно зменшує кількість відходів.

Цікавим напрямом застосування МОК є їх використання як матриць для створення нових електропровідних матеріалів, наприклад матеріалів з протонною провідністю. Як приклад можна навести МОК структурного типу UiO-66 складу $[\text{Zr}_6\text{O}_4(\text{OH})_4(\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_2(\text{SO}_3\text{H})_2-\text{CO}_2)_6]_n$, в каналах якого містяться кислотні групи — сульфогрупи [14]. При заповненні каналів водою в системі виникає електропровідність, зумовлена рухом іонів H^+ (протонна провідність). Електропровідність такого матеріалу становить 0,084 См/см за температури 80 °С і вологості повітря 90 %. Для порівняння: електропровідність морської води в середньому становить 0,03 См/см за кімнатної температури. Електропровідні матеріали на основі МОК можна використовувати як активні тіла сенсорів, зокрема для гігрометрів, матеріалів для детектування забруднювачів тощо. Цікаво, що сульфогрупи в наведеному вище прикладі МОК формуються в результаті окиснення тиольних груп ($-\text{SH}$) в уже готовому МОК, що відбувається без руйнування пористого каркасу та ілюструє можливість постсинтетичного модифікування таких систем. Багато МОК характеризуються високою стійкістю до дії кислот, лугів, окисників і можуть слугувати універсальними платформами для створення різних функціональних груп залежно від майбутнього застосування.

Завдяки тому, що МОК є кристалічними речовинами (на відміну від переважної більшості

пористих речовин інших класів), з їх використанням було вирішено низку фундаментальних проблем у галузі адсорбції. Так, методом рентгеноструктурного аналізу або нейтронографії вдалося безпосередньо локалізувати центри адсорбції різних субстратів (у тому числі газів) та експериментально встановити порядок заповнення таких центрів зі збільшенням тиску адсорбату. Унікальним варіантом застосування МОК є визначення будови речовин, які не вдається отримати у формі монокристалів, — такі сполуки можна адсорбувати в порах монокристала МОК, де вони надійно фіксуються адсорбційними силами, після чого з'являється можливість методом монокристалічного рентгеноструктурного аналізу визначити будову всієї системи — МОК разом із адсорбованою речовиною.

Сусуму Кітагава дослідив структурні перебудови в МОК, які відбуваються при заповненні пор «гостями» або при вивільненні таких «гостей» з пор [15]. Завдяки можливій зміні валентних кутів між зв'язками в координаційних сферах іонів металів форма пор у деяких МОК може змінюватися залежно від того, чи заповнені такі пори «молекулами-гостями». Такі МОК здобули назву «дихаючих сорбентів». Як приклад можна навести родину МОК структурного типу MIL-53, побудованих зв'язуванням іонів тривалентних металів з аніонами лінійних ароматичних дикарбонових кислот. Переріз каналів у полімерній сітці одного з таких МОК складу $[\text{Cr}^{\text{III}}(\text{OH})\{\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2\}]_n$ має форму ромба і може змінюватися — «складатися» або «розгортатися» залежно від заповнення іншими речовинами (рис. 9) [16]. Рушійною силою таких перебудов є енергія сорбції речовин у МОК. Конфігурація МОК у десольватованому стані, очевидно, відповідає мінімуму енергії, а структурна перебудова є енергетично невигідним процесом (інакше вона відбулася б самовільно). Лише в разі, якщо сорбція речовини супроводжується виділенням енергії, достатньо великої для компенсації витрати енергії на структурну перебудову, пори будуть «розгортатися». Так, при витримуванні МОК $[\text{Cr}^{\text{III}}(\text{OH})\{\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2\}]_n$

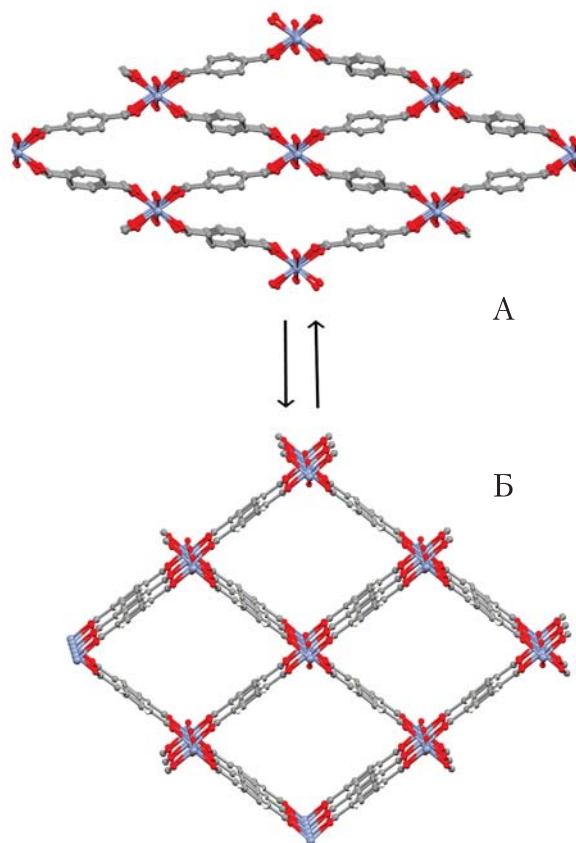


Рис. 9. Ефект «дихання» в МОК $\text{Cr}^{\text{III}}(\text{OH})\{\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2\}_n$: «складена» форма А переходить у «розгорнуту» форму Б і навпаки

у «складеній» формі в ацетоні або етанолі ці речовини не сорбуються, але при контакті з N,N -диметилформамідом пори «розгортаються» і заповнюються розчинником, оскільки його сорбція супроводжується достатнім виділенням енергії [16].

Ефект «дихання» має значний вплив на сорбційні властивості МОК — речовини, здатні ініціювати розкриття пор, сорбуються краще, ніж речовини, які зв'язуються з МОК відносно слабкими зв'язками і не можуть спричинити перебудову полімерної сітки. Таку особливість можна використати для селективної сорбції певних речовин. Модифікування «дихаючих» МОК введенням замісників до складу лігандів приводить до стабілізації «складеної» або «роз-

горнутої» форм, що й є способом регулювання селективності сорбції.

Невже МОК мають лише переваги над пористими речовинами інших класів? Звісно, ні. Серед істотних недоліків МОК можна назвати їхню відносно низьку термічну стабільність, порівняно низьку стійкість до дії кислот (хоча є винятки), а також досить високу вартість. Можливість застосування МОК у медицині обмежується потенційною токсичністю багатьох металів, які входять до їхнього складу як обов'язкові структурні елементи.

В Україні дослідженнями МОК займаються з другої половини 1990-х років. Серед вітчизняних наукових центрів, у яких проводять такі роботи, провідні позиції посідають Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України та хімічний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Українські дослідники створили низку нових МОК на основі як оригінальних, так і добре відомих лігандів, ретельно вивчили сорбційні властивості систем, у яких пориста сітка перебудовується залежно від наявності органічних сполук у порах [17]. Виявлено, що гнучкість каркасів МОК може не лише проявлятися в сорбційних властивостях, а й впливати на інші фізичні характеристики. На прикладі супрамолекулярних систем показано, що адсорбція субстрату може ініціювати структурну перебудову, яка полегшує сорбцію наступних порцій такого самого субстрату, і вперше запропоновано поняття кооперативності сорбції

в МОК та координаційних сполуках з гнучкими каркасами [18]. Концепцію кооперативності сорбції в МОК зараз використовують кілька наукових груп у світі [19]. Показано, що МОК можуть бути каталізаторами деяких органічних реакцій [20] та електрохімічних процесів [21], основою для створення електропровідних матеріалів [22]. Знайдено МОК, десольватація якого приводить до більш як двохразового змінення магнітної сприйнятливості в інтервалі від 2 К до кімнатної температури, а також супроводжується зміною забарвлення [23].

За приблизно 30 років, що минули після відкриття МОК, ці сполуки подолали шлях від лабораторних зразків до продуктів промислового виробництва. Сьогодні МОК уже стали звичайними речовинами для наукових досліджень і технічних розробок. Під час вибору матеріалу для вирішення того чи іншого наукового або технічного завдання їх розглядають в одному ряду з активованим вугіллям, цеолітами або силікагелем. Кілька міжнародних компаній виробляють МОК великими партіями, їх використовують як сорбенти, каталізатори, основу для створення функціональних матеріалів різного призначення. Звісно, МОК не замінять повністю пористі речовини інших класів, але вже зараз вони посідають чільне місце серед практично важливих пористих матеріалів, займаючи свою нішу. Водночас потенціал МОК до кінця ще не розкрито, і немає сумнівів, що в майбутньому буде знайдено нові унікальні властивості сполук цього класу.

REFERENCES

- Hoskins B.F., Robson R. Infinite polymeric frameworks consisting of three dimensionally linked rod-like segments. *J. Am. Chem. Soc.* 1989. **111**: 5962. <https://doi.org/10.1021/ja00197a079>
- Li H., Eddaoudi M., O'Keeffe M., Yaghi O.M. Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework. *Nature*. 1999. **402**: 276. <https://doi.org/10.1038/46248>
- Farha O.K., Eryazici I., Jeong N.C., Hauser B.G., Wilmer C.E., Sarjeant A.A., Snurr R.Q., Nguyen S.T., Yazaydin A.Ö., Hupp J.T. Metal-organic framework materials with ultrahigh surface areas: is the sky the limit? *J. Am. Chem. Soc.* 2012. **134**(36): 15016. <https://doi.org/10.1021/ja3055639>
- Sengupta D., Melix P., Bose S., Duncan J., Wang X., Mian M.R., Kirlikovali K.O., Joodaki F., Islamoglu T., Yildirim T., Snurr R.Q., Farha O.K. Air-stable Cu (I) metal-organic framework for hydrogen storage. *J. Am. Chem. Soc.* 2023. **145**: 20492. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c06393>
- Lin J.-B., Nguyen T.T.T., Vaidhyanathan R., Burner J., Taylor J.M., Durekova H., Akhtar F., Mah R.K., Ghaffari-Nik O., Marx S., Fylstra N., Iremonger S.S., Dawson K.W., Sarkar P., Hovington P., Rajendran A., Woo T.K., Shimizu G.K.H. A scalable metal-organic framework as a durable physisorbent for carbon dioxide capture. *Science*. 2021. **374**: 1464. <https://doi.org/10.1126/science.abi7281>
- Luo J., Luo X., Xie M., Li H.-Z., Duan H., Zhou H.-G., Wei R.-J., Ning G.-H., Li D. Selective and rapid extraction of trace amount of gold from complex liquids with silver (I)-organic frameworks. *Nature Commun.* 2022. **13**: 7771. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35467-z>
- Abtab S.M.T., Alezi D., Bhatt P.M., Shkurenko A., Belmabkhout Y., Aggarwal H., Weseliński Ł.J., Alsadun N., Samin U., Hedhili M.N., Eddaoudi M. Reticular chemistry in action: a hydrolytically stable MOF capturing twice its weight in adsorbed water. *Chem.* 2018. **4**(1): 94. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.11.005>
- Bavykina A., Kolobov N., Khan I.S., Bau J.A., Ramirez A., Gascon J. Metal-organic frameworks in heterogeneous catalysis: recent progress, new trends, and future perspectives. *Chem. Rev.* 2020. **120**(16): 8468. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00685>
- Carson F., Agrawal S., Gustafsson M., Bartoszewicz A., Moraga F., Zou X., Martín-Matute B. Ruthenium complexation in an aluminium metal-organic framework and its application in alcohol oxidation catalysis. *Chem. Eur. J.* 2012. **18**: 15337. <https://doi.org/10.1002/chem.201200885>
- Sun N., Shah S.S.A., Lin Z., Zheng Y.-Z., Jiao L., Jiang H.-L. MOF-based electrocatalysts: an overview from the perspective of structural design. *Chem. Rev.* 2025. **125**(5): 2703. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00664>
- Kuang X., Ma Y., Su H., Zhang J., Dong Y.-B., Tang B. High-performance liquid chromatographic enantioseparation of racemic drugs based on homochiral metal-organic framework. *Anal. Chem.* 2014. **86**(2): 1277. <https://doi.org/10.1021/ac403674p>
- Pramanik S., Hu Z., Zhang X., Zheng C., Kelly S., Li J. A systematic study of fluorescence-based detection of nitroexplosives and other aromatics in the vapor phase by microporous metal-organic frameworks. *Chem. Eur. J.* 2013. **19**: 15964. <https://doi.org/10.1002/chem.201301194>
- Yuan B., Pan Y., Li Y., Yin B., Jiang H. A highly active heterogeneous palladium catalyst for the Suzuki—Miyaura and Ullmann coupling reactions of aryl chlorides in aqueous media. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2010. **49**: 4054. <https://doi.org/10.1002/anie.201000576>
- Phang W.J., Jo H., Lee W.R., Song J.H., Yoo K., Kim B., Hong C.S. Superprotonic conductivity of a UiO-66 framework functionalized with sulfonic acid groups by facile postsynthetic oxidation. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015. **54**: 5142. <https://doi.org/10.1002/anie.201411703>
- Kondo M., Yoshitomi T., Matsuzaka H., Kitagawa S., Seki K. Three-dimensional framework with channeling cavities for small molecules: $\{[M_2(4,4'\text{-bpy})_3(\text{NO}_3)_4]\cdot x\text{H}_2\text{O}\}_n$ ($M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}$). *Angew. Chem. Int. Ed.* 1997. **36**(16): 1725. <https://doi.org/10.1002/anie.199717251>
- Serre C., Millange F., Thouvenot C., Noguès M., Marsolier G., Louër D., Férey G. Very large breathing effect in the first nanoporous chromium (III)-based solids: MIL-53 or $\text{Cr}^{\text{III}}(\text{OH})\cdot\{\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2\}\cdot\{\text{HO}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2\text{H}\}_x\cdot\text{H}_2\text{O}_y$. *J. Am. Chem. Soc.* 2002. **124**(45): 13519. <https://doi.org/10.1021/ja0276974>
- Polunin R.A., Kolotilov S.V., Kiskin M.A., Cadore O., Golhen S., Shvets O.V., Ouahab L., Dobrokhotova Z.V., Ovcharenko V.I., Eremenko I.L., Novotortsev V.M., Pavlishchuk V.V. Structural flexibility and sorption properties of 2D porous coordination polymers constructed from trinuclear heterometallic pivalates and 4,4'-bipyridine. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2011. **2011**: 4985. <https://doi.org/10.1002/ejic.201100791>
- Pavlishchuk A.V., Kolotilov S.V., Zeller M., Shvets O.V., Fritsky I.O., Lofland S.E., Addison A.W., Hunter A.D. Magnetic and sorption properties of supramolecular systems based on pentanuclear copper (II) 12-metallacrown-4 complexes

- and isomeric phthalates: structural modeling of the different stages of alcohol sorption. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2011. **2011**: 4826. <https://doi.org/10.1002/ejic.201100790>
19. Guo J., Chu S., Yuan F., Otake K., Yao M.-S., Kitagawa S. Soft porous crystals: flexible MOFs as a new class of adaptive materials. *Ind. Chem. Mater.* 2025. **3**: 651. <https://doi.org/10.1039/D5IM00067J>
 20. Sotnik S.A., Polunin R.A., Kiskin M.A., Kirillov A.M., Dorofeeva V.N., Gavrilenko K.S., Eremenko I.L., Novotortsev V.M., Kolotilov S.V. Heterometallic coordination polymers assembled from trigonal trinuclear Fe₂Ni-pivalate blocks and polypyridine spacers: topological diversity, sorption, and catalytic properties. *Inorg. Chem.* 2015. **54**: 5169. <https://doi.org/10.1021/ic503061z>
 21. Lytvynenko A.S., Kolotilov S.V., Kiskin M.A., Cador O., Golhen S., Aleksandrov G.G., Mishura A.M., Titov V.E., Ouahab L., Eremenko I.L., Novotortsev V.M. Redox-active porous coordination polymers prepared by trinuclear heterometallic pivalate linking with the redox-active nickel (II) complex: synthesis, structure, magnetic and redox properties, and electrocatalytic activity in organic compound dehalogenation in heterogeneous medium. *Inorg. Chem.* 2014. **53**: 4970. <https://doi.org/10.1021/ic403167m>
 22. Gurtovyi R.I., Tsybmal L.V., Kuzmin R.M., Odynets I.V., Lampaka Ya.D. Effect of the redox properties of the zinc and nickel metal-organic frameworks on peculiarities of their interaction with iodine and the electronic conductivity of the composites formed. *Theor. Exp. Chem.* 2016. **52**: 104. <https://doi.org/10.1007/s11237-016-9457-7>
 23. Polunin R.A., Burkovskaya N.P., Satska J.A., Kolotilov S.V., Kiskin M.A., Aleksandrov G.G., Cador O., Ouahab L., Eremenko I.L., Pavlishchuk V.V. Solvent-induced change of electronic spectra and magnetic susceptibility of Co^{II} coordination polymer with 2,4,6-tris(4-pyridyl)-1,3,5-triazine. *Inorg. Chem.* 2015. **54**: 5232. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5b00179>

Sergey V. Kolotilov

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4780-4378>

METAL-ORGANIC FRAMEWORK COMPOUNDS:

WHAT POTENTIAL DID THE NOBEL COMMITTEE SEE IN THEM?

Nobel Prize in Chemistry 2025

This year, the Nobel Prize in Chemistry was awarded to three scientists — Japanese professor Susumu Kitagawa from the Institute for Integrated Cell-Material Sciences (iCeMS) at Kyoto University, British researcher Richard Robson from the University of Melbourne, and American chemist Omar M. Yaghi from the University of California, Berkeley — “for the development of metal-organic frameworks”. As noted in the Nobel Committee’s press release, the researchers have used the metal-organic frameworks they created to solve many pressing problems for humanity: harvest water from desert air, extract pollutants from water, capture carbon dioxide and store hydrogen, etc.

Keywords: Nobel Prize in Chemistry 2025, Susumu Kitagawa, Richard Robson, Omar M. Yaghi, metal-organic frameworks.

Cite this article: Kolotilov S.V. Metal-organic framework compounds: what potential did the Nobel Committee see in them? (Nobel Prize in Chemistry 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (12): 31—44. <https://doi.org/10.15407/visn2025.12.031>