

2. M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto and Y. Matsuura. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe // J. Appl. Phys. 1984. V.66(6). P. 2083–2087. DOI: 10.1063/1.333572.

3. D. Givord, H.S. Li, J.M. Moreau. Magnetic properties and crystal structure of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B // Solid State Communications. 1984. V. 50, Issue 6. P. 497–499.

**Бускис К.П.**

**ГО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск,  
Республика Беларусь  
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ  
(МОК) В ЭНЕРГЕТИКЕ**

В 90-х годах прошлого века был получен новый тип соединений состоящих из ионов металлов, координированных между собой с помощью мостиковых органических лигандов (атомы, ионы или молекулы, связанные с неким центром – акцептором). Эти соединения получили название «металл-органические каркасы», или же МОК (от англ. metal-organic frameworks – MOF).

По сути, МОК можно назвать органическим цеолитом. Однако, они имеют намного больше вариаций своего строения, чем цеолиты. Также МОК имеют более привлекательные параметры структуры. Например, их удельная поверхность может достигать 5000-10000 м<sup>2</sup>/г, а объём пор – 2–3 см<sup>3</sup>/г, для цеолитов эти же величины составляют 500–600 м<sup>2</sup>/г, 0.3–0.4 см<sup>3</sup>/г. Эти характеристики открывают множество вариантов их применения в будущем.

МОК представляют собой новый класс пористых материалов. Благодаря огромной вариативности в выборе исходных компонентов они характеризуются огромным разнообразием возможных структур, что позволяет исследователям создавать материалы с необходимыми свойствами. Для синтеза этих структур применяются как традиционные методы (с применением растворителя), так и нетрадиционные. В результате синтеза можно получать одно-, двух- и трёхмерные структуры с различными размерами пор, величину которых можно варьировать путём подбора органических лигандов, или же линкеров [1].

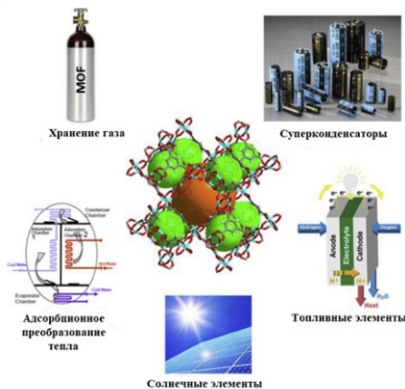


Рисунок 1 – Потенциальные направления применения МОК в сфере энергетики [2]

В настоящее время учёные многих стран ведут активные исследования свойств металл-органических каркасов, что позволяет найти применение в различных отраслях, одной из которых является и энергетика. Наиболее перспективными направлениями является применение МОК в солнечных панелях, для реакции выделения водорода и для хранения газов (рисунок 1).

В солнечных панелях металл-органические каркасы не могут соперничать с существующими в настоящее время солнечными элементами в эффективности преобразования. Однако, применение МОК в солнечных элементах позволяет увеличить их КПД. Например, применение MIL-125 в качестве композита с  $\text{TiO}_2$  позволило увеличить КПД с 2,5 % для чистого  $\text{TiO}_2$  до 6,4% для композитного соединения при введении 3 % MIL-125 в  $\text{TiO}_2$  [3]. На данный момент результаты исследований показывают, что МОК не могут также эффективно, как солнечные элементы, преобразовывать тепло, но могут повысить их эффективность в виде композитного соединения.

В области водородной энергетики МОК используется для выделения водорода в ходе реакции расщепления воды. Существует три подхода к применению металл-органических каркасов в сфере водородной энергетики:

1. прямое включение фотосенсебилизатора в каркас;
2. адсорбция фотосенсебилизатора в порах МОК;
3. использование МОК в качестве предшественника для синтеза композиционного материала для электрода.

Преимуществом использования металл-органических каркасов является их более низкая стоимость по сравнению с традиционным оборудованием для фотокатализа, а также возможность работать при облучении видимым светом [4].

В большинстве своём МОК имеют сверхвысокую пористость, что является очень привлекательным параметром для хранения газов. Все впервые синтезированные МОК проверяются на гравиметрические и объёмные показатели с помощью экспериментов по адсорбции под высоким давлением с водородом и метаном. Наилучшим вариантом для хранения метана на данный момент является DUT-49, имеющий избыточную адсорбцию 308 мг на 1 г МОК при давлении 110 бар и температуре 298 К. В случае криогенного хранения водорода, наилучшим выбором является NU-100 с избыточной адсорбцией 99,5 мг на 1 г МОК при давлении 56 Бар и температуре 77 К. Однако, есть несколько факторов, ограничивающих применение МОК в данной области – дорогая цена на материалы МОК и их плохая теплопроводность. Проблему теплопроводности можно решить с помощью применения сложных систем управления теплом [5].

Подводя итог, можно сказать, что металл-органические каркасы имеют хороший потенциал для применения в сфере энергетики.

#### Список использованных источников

1. Synthetic strategies, structure patterns, and emerging properties in the chemistry of modular porous solids / O.M. Yaghi [и др.] // *Accounts of Chemical Research*. – 1998. – Т. 31, № 8. – С. 474–484.

2. Bon, V. Metal-organic frameworks for energy-related applications / V. Bon // *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. – 2017. – № 4. – С. 44–49.

3. The first depleted heterojunction TiO<sub>2</sub>-MOF-based solar cell / A.M. Vinogradov [и др.] // *Chemical Communications*. – 2014. – № 71. – С. 10210–10213.

4. A dye-like ligand-based metal-organic framework for efficient photocatalytic hydrogen production from aqueous solution / X. Sun [и др.] // *Catalysis Science & Technology*. – 2016. – № 11. – С. 3840–3844

5. Li, S-L. Metal-organic frameworks as platforms for clean energy / Shun-Li Li, Qiqang Xu // *Energy & Environmental Science*. – 2013. – № 6. – С. 1656–1683.