

Ұлан Ержанұлы Жанतिकеев – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, докторант; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1200-2340>.

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев* – PhD, қауымд.профессор, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, «Химия және экология» кафедрасы; e-mail: n.nurgaliyev@semgu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Азат Сейтхан – PhD, доцент, Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының меңгерушісі; e-mail: a.seitkhan@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Сведения об авторах

Инабат Омирузаковна Сапаргали – Сатпаев университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, магистр технических наук; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>.

Калампыр Сунакбаевна Бексейтова – Сатпаев университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, магистр технических наук; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5510-7660>.

Улан Ержанович Жанतिकеев – Сатпаев университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, докторант; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1200-2340>.

Нуржан Нурлыбекович Нурғалиев* – PhD, ассоц. профессор кафедры Химии и экологии, НАО Университета имени Шакарима; e-mail: n.nurgaliyev@semgu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Азат Сейтхан – PhD, доцент, руководитель лаборатории инженерного профиля, Университета Сатпаева; e-mail: a.seitkhan@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Information about the authors

Inabat Omirzakkyzy Sapargali – Satpayev university, researcher of engineering laboratory, master of technical science; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>.

Kalampyr Sunakbaikzy Bekseitova – Satpayev university, researcher of engineering laboratory, master of technical science; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5510-7660>.

Ulan Erzhnuly Zhantikeev – Satpayev university, researcher of engineering laboratory, PhD student; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1200-2340>.

Nurzhan Nurlybekovich Nurgaliyev – PhD, assoc.professor, Shakarim university, department of «Chemistry and ecology»; e-mail: n.nurgaliyev@semgu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Azat Seitkhan – PhD, associate professor, Satpayev university, head of engineering laboratory; e-mail: a.seitkhan@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Поступила в редакцию 20.02.2025

Поступила после доработки 07.03.2025

Принята к публикации 13.03.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-52](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-52)

MPHTI: 31.17.29



А.Т. Табынбаева¹, К. Тоштай¹, Н.А. Ахметов², К.Т. Тастамбек^{1,2}, Ж.Т. Тауанов^{1,2*}

¹Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби,
050038, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Аль-Фараби 71

²Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави,
161200, Республика Казахстан, г. Туркестан, пр. Б.Саттарханова, 29

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ КРАСИТЕЛЯ КОНГО КРАСНОГО (Congo Red)

Аннотация: В данной статье подробно рассматриваются синтез и структурные характеристики металлоорганических каркасов (МОК), в частности ZIF-8 и ZIF-67, и их перспективы применения в области очистки воды от токсичных органических загрязнителей. Эти материалы относятся к классу пористых координационных полимеров, которые привлекают внимание благодаря своей уникальной кристаллической структуре, высокой удельной поверхности и возможностям для модификации пористости и функциональных групп. Особое внимание уделено исследованию адсорбционных свойств ZIF-8 и ZIF-67 на примере удаления токсичного анионного

красителя конго красного из водных растворов, что позволяет оценить их эффективность в качестве адсорбентов. Проведенные исследования показали, что оба материала обладают высокой емкостью адсорбции, которая составила 74,15 мг/г для ZIF-8 и 81,27 мг/г для ZIF-67, что объясняется возможностью молекул красителя проникать в пористую структуру каркасов. Адсорбция конго красного соответствует модели изотермы Ленгмюра, указывая на преимущественное монослойное взаимодействие с поверхностью адсорбента. Кинетический анализ показал, что ZIF-67 достигает 53,8% эффективности удаления красителя за 24 часа, а ZIF-8-46,6%, что подтверждает значительный потенциал данных материалов в химической и экологической инженерии для эффективной очистки сточных вод.

Ключевые слова: металл-органический каркас, ZIF-8, ZIF-67, конго красный, адсорбция, очистка воды.

1. Введение

Загрязнение водных ресурсов – одна из главных экологических проблем современного мира. Быстрое развитие промышленности, особенно в таких отраслях, как текстиль, кожа и химия, приводит к сбросу значительного количества токсичных органических соединений, красителей, тяжелых металлов и других загрязняющих веществ в водные системы. В последние годы все больше внимания уделяется использованию пористых материалов, таких как активированный уголь, цеолиты, металлоорганические каркасы [1].

Металлоорганические каркасы (МОК) представляют собой класс пористых кристаллических материалов, которые состоят из металлических узлов, соединённых органическими лигандами [2]. Эти материалы характеризуются уникальными физико-химическими свойствами, включая высокую площадь внутренней поверхности (до 6000 м²/г) и регулируемую пористость, что позволяет им быть эффективными адсорбентами для различных веществ [3, 4]. За последние два десятилетия МОК привлекли значительное внимание учёных из-за их широкого спектра потенциальных применений, включая хранение газов, катализ, доставку лекарств и очистку воды [5, 6].

Металлоорганические каркасы (МОК) демонстрируют большой потенциал в области экологической химии, особенно в задачах очистки сточных вод. Они эффективны для удаления различных загрязнителей, включая тяжелые металлы, такие как ртуть, и органические красители [7, 8]. Промышленные выбросы часто содержат токсичные органические вещества, такие как красители, которые могут вызывать серьёзное загрязнение водных ресурсов [9]. Один из таких загрязнителей – конго красный (Congo Red), широко применяемый в текстильной и других отраслях промышленности. Этот краситель является стойким к биологическому разложению и может вызывать негативные эффекты на здоровье человека и экосистемы [10]. В связи с этим, существует необходимость в разработке эффективных методов его удаления из сточных вод.

В последние годы было предложено множество подходов для очистки воды от органических загрязнителей, включая физические, химические и биологические методы. Среди них адсорбция зарекомендовала себя как один из наиболее простых и эффективных способов удаления токсичных веществ [11]. МОК, благодаря своим уникальным структурным характеристикам, выступают перспективными материалами для использования в этой области. Они могут эффективно удалять загрязнители, такие как Конго красный, из водных растворов за счёт своей высокой адсорбционной ёмкости и способности к регенерации [12].

Данная работа посвящена изучению адсорбционных свойств синтезированных МОК при удалении конго красного из водных растворов. Задачей исследования является оценка эффективности различных МОК при адсорбции этого красителя, а также анализ факторов, влияющих на адсорбционную способность материалов, таких как структура каркаса, размер пор и химическая природа поверхности. Это исследование важно не только с точки зрения разработки новых адсорбентов для очистки воды, но и для понимания механизмов взаимодействия МОК с органическими загрязнителями [13].

Целью данной исследовательской работы является изучение синтеза и характеристик металлоорганических каркасов, а также их потенциального использования в качестве адсорбентов. Методология исследования направлена на синтез различных металлоорганических каркасов с использованием доступных реагентов и условий. Были изучены их структурные и морфологические особенности с описанием полученных материалов современными аналитическими методами, такими как рентгеноструктурный анализ (РСА),

сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), энерго-дисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС), ультрафиолетовая спектроскопия (УФ) и метод БЭТ (Брунауэра-Эмметта-Теллера) для оценки специфической поверхности и пористости материалов. Это исследование позволяет оценить потенциал металл-органических каркасов, расширить области их применения и создать новые материалы.

Адсорбционные свойства материалов оцениваются на примере удаления конго красного из водных растворов. Данное исследование позволяет оценить эффективность и потенциал металл-органических каркасов, синтезированных для очистки воды, демонстрирующих высокие адсорбционные способности и практическое применение в решении современных задач химической и экологической инженерии, благодаря их уникальной структуре и возможности точной настройки функциональных свойств, что предполагает расширение их использования в ближайшем будущем.

2 Условия и методы исследования

2.1 Материалы. Реагенты, использованные для синтеза ZIF-8 и ZIF-67: $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (гексагидрат нитрата цинка, $\geq 99\%$), $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (гексагидрат нитрата кобальта, $\geq 99\%$), 2-метилимидазол (2-MIM, $\geq 99\%$), NaOH (гидроксид натрия, $\geq 98\%$) и дистиллированная вода (высокой чистоты).

Для характеристики синтезированных металл-органических каркасов использовались следующие методы: Минералогический состав образцов был проанализирован методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием дифракционной системы MPD XCEL-221 при параметрах 30 кВ и 10 мА, применяя излучение $CuK\alpha$ ($\lambda = 1,540056 \text{ \AA}$) со скоростью сканирования $0,02^\circ/\text{s}$ в диапазоне 2θ от 10° до 60° .

Для расчета удельной поверхности, объема пор и распределения пор по размерам использовалась теория Брунауэра-Эмметта-Теллера. Адсорбционные свойства материалов изучались с помощью записи изотерм адсорбции азота с использованием прибора Autosorb-1 (Quantachrome Instruments, UK) в диапазоне относительных давлений от 0,005 до 0,991.

Для исследования морфологии и элементного состава образцов применялась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) с автоэмиссионной пушкой и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС) (Joel JSM-6490 LA, Япония) при ускоряющем напряжении 5 кВ. EDS использовалась для проведения элементного анализа и характеристики химического состава поверхности синтезированных материалов.

2.2 Синтез ZIF-8. Синтез ZIF-8 проводился при комнатной температуре. Для ZIF-8 в качестве источника ионов Zn^{2+} использовался гидратированный нитрат цинка, а в качестве органического связующего-2-метилимидазол (2-MIM). Сначала проводилось приготовление раствора NaOH. Для этого NaOH берут в 4 раза больше по массе чем $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$. Для приготовления 1-го раствора были растворены 1,466 г $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ в 100 мл раствора NaOH. Схема синтеза представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема синтеза ZIF-8 при комнатной температуре

Для приготовления 2-го раствора 3,244 г 2-метилимидазола в 100 мл NaOH. На следующем этапе раствор $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ быстро добавляли в раствор 2-метилимидазола и помещали в магнитный миксер на 30 минут. Затем ZIF-8 осаждали из раствора центрифугированием при 6000 об/мин. Осадок промывали 2 раза 50 мл раствором NaOH, затем дистиллированной водой до достижения нейтрального pH. На последнем этапе осадок сушили в сушильной печи при $50-70^\circ\text{C}$ в течение 12 часов. На рис. 1 приведена схема синтеза ZIF-8 при комнатной температуре [14].

2.3 Синтез ZIF-67. Синтез ZIF-67 проводился в автоклаве. Гидратированный нитрат кобальта использовался в качестве источника ионов Co^{2+} , а 2-метилимидазол (2-MIM) - в качестве органического связующего. 0,45 г $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ растворили в 3 мл дистиллированной воды. В 20 мл дистиллированной воды растворили 5,5 г 2-метилимидазола. Схема синтеза представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема гидротермального синтеза ZIF-67

Два приготовленных раствора хорошо перемешали и вылили в тефлоновую емкость автоклава. Автоклав был помещен в сушильный шкаф на 40 минут при 120°C . После синтеза ZIF-67 осаждали из раствора центрифугой при 6000 об/мин. Осадок промывали дистиллированной водой, затем сушили при $50\text{-}70^\circ\text{C}$ [15].

2.4 Кинетика адсорбции. Кинетика адсорбции изучалась с использованием 10 мл раствора конго красного с начальной концентрацией 100 мг/л и содержанием адсорбента 0,025 г. Эксперименты проводились при температуре окружающей среды, атмосферном давлении и статических условиях. Кинетические точки (0,5 ч, 1 ч, 2 ч, 4 ч, 8 ч, 24 ч) были проанализированы с использованием 1 мл аликвоты из пластиковых пробирок. Эффективность удаления красителя адсорбентом в каждой адсорбционной кинетической точке была рассчитана с использованием разницы концентраций между исходными точками и текущими точками кинетики адсорбции. В качестве контрольного раствора использовалась дистиллированная вода.

2.5 Изотерма адсорбции. В пластиковых тубах по 50 мл смешивали 20 мл раствора конго красного в различных начальных концентрациях от 10 до 500 мг/л. Растворы с адсорбентами взбивали в орбитальном шейкере со скоростью 150-200 об / мин в течение 24 часов при комнатной температуре. Количество адсорбированного красящего вещества вычисляли по уравнению (1):

$$q_{\max} = \frac{(C_i - C_{eq})V}{m} \quad (1)$$

Здесь q_{\max} – максимальная адсорбционная емкость (мг/г), C_i и C_{eq} соответственно концентрация первичного и равновесного красителя (мг/л), V – объем раствора (мл), m – масса используемого адсорбента (г).

Модель адсорбции Ленгмюра подходит для систем с однородными центрами адсорбции, а модель Фрейндлиха подходит для систем с неоднородными, то есть гетерогенными поверхностями.

Линейный тип изотермы Ленгмюра:

$$\frac{C_{eq}}{q_{eq}} = \frac{1}{q_{\max}K_L} + \frac{C_{eq}}{q_{\max}} \quad (2)$$

Здесь C_{eq} (мг/л) – равновесная концентрация конго красного в водной фазе, q_{eq} и q_{\max} (мг/г) – равновесная и максимальная способность удаления красителя и K_L (л/мг) – постоянная Ленгмюра.

Линейный тип изотермы Фрейндлиха:

$$\log q_{eq} = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_{eq} \quad (3)$$

Здесь C_{eq} (мг/л) равновесная концентрация конго красного в водной фазе, q_{eq} (мг/г) равновесная адсорбционная способность, n (безразмерная) и K_F постоянная Фрейндлиха.

Для оценки эффективности удаления Конго красного из водных растворов в данном исследовании использовался UV-Vis спектрофотометр Peak Instruments C-7000, с помощью которого измерялась концентрация красителя до и после адсорбции.

3 Результаты исследования и обсуждение

3.1 Анализ образцов с использованием рентгенофазового анализа (РФА). Спектр рентгеновской порошковой дифракции материалов ZIF-8 и ZIF-67 показан на рисунке 3.

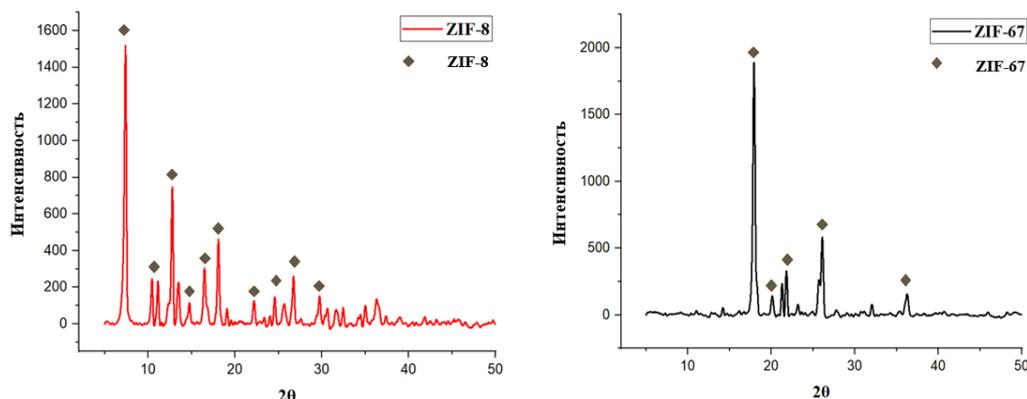


Рисунок 3 – РФА спектры ZIF-8 и ZIF-67

На рентгенограмме пики при углах 2θ $7,30^\circ$, $10,35^\circ$, $12,70^\circ$, $14,80^\circ$, $16,40^\circ$ и $18,00^\circ$ соответствуют кристаллическим плоскостям (110), (200), (211), (220), (310) и (222), что свидетельствует о кристаллическости синтезированного ZIF-8. Пики при углах $16,5^\circ$ (022), $18,0^\circ$ (013), $22,1^\circ$ (222) и $29,6^\circ$ (134) соответствуют различным плоскостям кристаллической решётки. Значения углов 2θ для основных пиков соответствуют известным данным по ZIF-67, что подтверждает правильность кристаллической структуры материала.

3.2 Исследование морфологии с помощью сканирующей электронной микроскопии и энергетической дисперсионной спектроскопии. Морфология поверхности ZIF-8, исследованная с помощью сканирующей электронной микроскопии, демонстрирует пористую структуру. Частицы выглядят как агрегаты мелких частиц, что характерно для структур металл-органических каркасов. Поверхность частиц неравномерная, пористая, с видимыми зернистыми элементами, что указывает на кристаллическую природу материала. Неровная поверхность с множеством выступов может свидетельствовать о наличии микропор. Частицы ZIF-8 обладают характерной шероховатой и неоднородной формой.

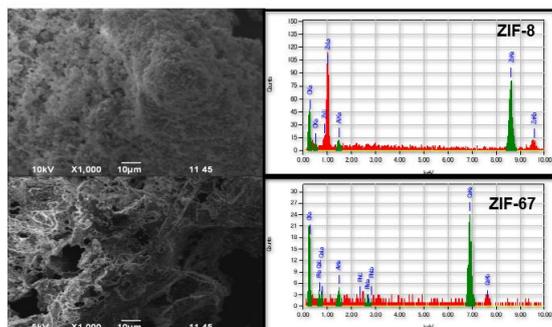


Рисунок 4 – Снимки СЭМ и ЭДС спектры для ZIF-8 и ZIF-67

В случае ZIF-67 частицы также агрегированы, с неровной и шероховатой поверхностью. Пористая сеть хорошо просматривается, что говорит о значительной площади поверхности, способствующей эффективной адсорбции. Частицы имеют чётко выраженные кристаллические грани, а структура характеризуется типичной пористостью, как видно по снимкам СЭМ на 4 рисунке. На ЭДС спектрах представлены ZIF-8 и ZIF-67. Для ZIF-8 видны пики цинка, углерода, натрия и кислорода. Натрий, вероятно, связан с использованием раствора гидроксида натрия при синтезе. Также можно заметить небольшие пики других элементов, таких как алюминий, что может указывать на загрязнение. В ZIF-67 доминируют пики кобальта, углерода и кислорода. В таблице 1 приведены данные о атомном и массовом распределении элементов, полученные в результате ЭДС.

Таблица 1 – Атомное и массовое распределение элементов по результатам ЭДС

ZIF-67			ZIF-8		
Элемент	Атом, %	Масса, %	Элемент	Атом, %	Масса, %
C	58,79	83,55	C	53,41	79,51
O	9,54	5,87	O	8,51	9,51
Co	31,67	10,58	Na	1,46	0,97
			Zn	36,62	10,01

3.3 Оценка удельной поверхности и пористости с помощью метода Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Удельная поверхность материала ZIF-67 по методу БЭТ составляет 28,39 м²/г. Объем микропор ($\leq 2,07$ нм): 0,0111 см³/г. Общий объем пор ($\leq 39,13$ нм): 0,0114 см³/г. Доля микропор составляет 90-94%. Мезопоры от 1 до 5%. Эти результаты подтверждают, что синтезированный ZIF-67 является наноразмерным материалом. На рисунке 5 представлены изотермы адсорбции/десорбции азота для ZIF-67.

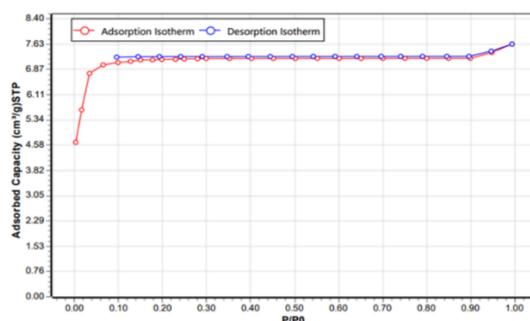


Рисунок 5 – Изотермы адсорбции/десорбции азота для ZIF-67

3.4 Исследование адсорбционных свойств материалов. Исследование изотерм адсорбции. Изотермы адсорбции были исследованы для определения показателей адсорбции металлоорганических каркасов ZIF-8 и ZIF-67 (рис. 6).

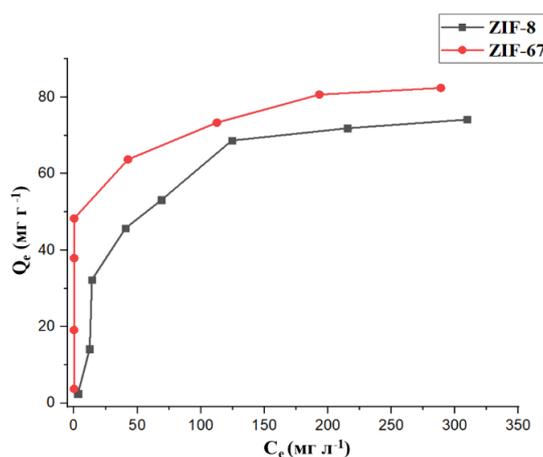


Рисунок 6 – Изотермы адсорбции для ZIF-8 и ZIF-67

Для определения показателей адсорбции материалов использовались модели Ленгмюра и Фрейндлиха. Результаты расчетов по данным моделям указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Расчеты по адсорбционным моделям Ленгмюра и Фрейндлиха

Материал	Эксперимент	Ленгмюр			Фрейндлих		
	q _{max} , мг/г	q _{max} , мг/г	K _L	R ²	n	K _F	R ²
ZIF-8	74,15	120,48	0,0066	0,97	0,67	2,53	0,82
ZIF-67	81,27	151,52	0,1982	0,99	0,29	19,83	0,71

Изотерма адсорбции металлоорганического каркаса ZIF-8 больше соответствует модели Ленгмюра, чем модели Фрейндлиха (коэффициент корреляции 0,82 и 0,97 соответственно). Это показывает, что процесс адсорбции молекул является мономолекулярным и однородным, а взаимодействие между адсорбированными молекулами минимально. Изотерма адсорбции металлоорганического каркаса ZIF-67 больше соответствует модели Ленгмюра, чем модели Фрейндлиха (коэффициент корреляции 0,71 и 0,99 соответственно)

Анализ кинетики адсорбции. Результаты адсорбционной кинетики показаны на рис.7 ZIF-67 достиг эффективности удаления до 46,9% через 30 минут и 53,8% через 24 часа. ZIF-8 составляет 27,6% через 30 минут и 46,6% через 24 часа соответственно. Наблюдается очень быстрое течение адсорбции (рис. 7).

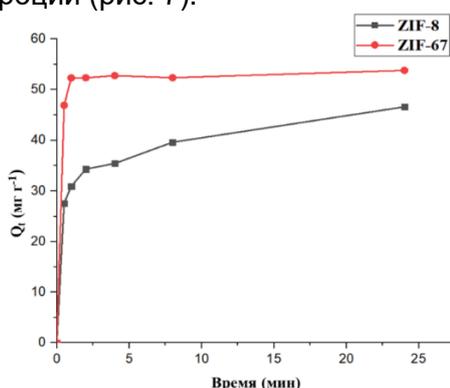


Рисунок 7 – Кривые кинетики адсорбции для ZIF-8 и ZIF-67

Механизм адсорбции: основные пути взаимодействия конго красного с полученными адсорбентами. Чтобы глубже понять механизм адсорбции, необходимо рассмотреть структуру молекул конго красного и ZIF-67 с ZIF-8. Конго красный представляет собой анионное органическое красящее вещество с ароматическими кольцами, а ZIF – 67 с ZIF-8 представляют собой металл – органические каркасы с ароматическими имидазольными кольцами. Взаимодействие между такими ароматическими системами играет решающую роль в процессе адсорбции, а также в образовании координационных связей между молекулами. В этом контексте анализ структур молекул конго красного и ZIF-67 является ключом к предсказанию и пониманию механизмов, лежащих в основе эффективной адсорбции на материале ZIF-67. Возможный механизм адсорбции конго красного на ZIF-67 (рис. 8).

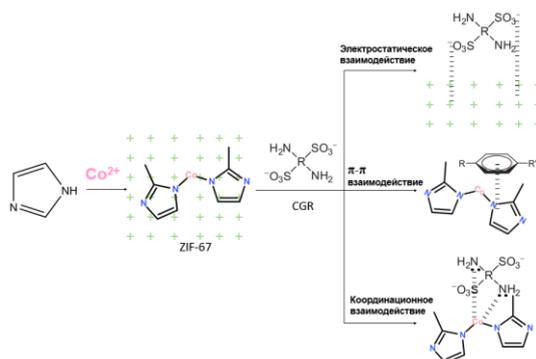


Рисунок 8 – Механизм адсорбции конго красного по отношению к адсорбенту ZIF-67

π - π взаимодействие между ароматическими кольцами конго красного и имидазольными кольцами молекулярной структуры ZIF-67 обеспечивает эффективную адсорбцию. Этот механизм ясно объясняет высокую адсорбционную способность адсорбентов, содержащих sp^2 -гибридизированный углерод, к ароматическим адсорбатам. Кроме того, следует отметить, что взаимодействие атомов азота и кислорода в молекулах конго красного с ионами Co^{2+} в структуре ZIF-67 способствует образованию координационных связей, которые также играют важную роль в процессе адсорбции. Механизм адсорбции для ZIF-8 аналогичен тому, который наблюдается для ZIF-67.

Заключение

Адсорбционные исследования показали, что материалы ZIF-67 и ZIF-8 обладают высокой эффективностью в удалении красителя конго красный из воды. При концентрации красителя 100 мг/л эффективность удаления составила 54% для ZIF-67 и 47% для ZIF-8, а при концентрации 50 мг/л она возросла до 97,6% и 90,4% соответственно. Адсорбционная ёмкость составила 74,15 мг/г для ZIF-67 и 81,27 мг/г для ZIF-8. Оба адсорбента демонстрировали адсорбционные свойства, соответствующие модели изотермы Ленгмюра (коэффициенты корреляции R^2 составили 0,99 для ZIF-67 и 0,97 для ZIF-8).

Проведённый анализ методом БЭТ позволил определить важнейшие структурные характеристики материала ZIF-67, которые подтверждают его высокий потенциал для практического применения. Удельная поверхность материала составила 28,3897 м²/г, что свидетельствует о наличии развитой пористой структуры. Значение общего объёма пор ($\leq 39,13$ нм) составило 0,0114 см³/г, в то время как объём микропор ($\leq 2,07$ нм) составил 0,0111 см³/г. Таким образом, микропоры составляют 90-94% от общего объёма пор, что указывает на доминирование микропористой структуры. Такие структурные характеристики обеспечивают ZIF-67 отличные адсорбционные свойства, которые особенно важны для экологических приложений. Высокая пористость материала и его способность к селективной адсорбции делают его перспективным для использования в процессах очистки сточных вод, включая удаление органических загрязнителей, тяжёлых металлов и других вредных веществ.

Список литературы

1. Effect of metal atom in zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-8 & 67) for removal of Pb²⁺ & Hg²⁺ from water / K. Ahmad et al // Food and Chemical Toxicology. – 2021. – № 149. – P. 112008. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112008>.
2. Yusuf V.F. Review on Metal-Organic Framework Classification, Synthetic Approaches, and Influencing Factors: Applications in Energy, Drug Delivery, and Wastewater Treatment / V.F. Yusuf, N.I. Malek, S.K. Kailasa // ACS Omega. – 2022. – № 7. – P. 44507–31. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05310>.
3. Metal-organic frameworks: structure, properties, methods of synthesis and characterization / V.V. Butova et al // Russian Chemical Reviews. – 2016. – № 85. – P. 280-307. <https://doi.org/10.1070/rcr4554>.
4. Khosravi A. Synthesis, characterization, and application of ZIF-8 for removal of Cd, Ni, and Pb ions from aqueous solutions: Optimization of the process by Response Surface Methodology (RSM) based on Central Composite Design (CCD) technique / A. Khosravi, M. Randjbar, R. Habibpour // Journal of Metals, Materials and Minerals. – 2023. – № 33. – P. 88-102. <https://doi.org/10.55713/jmmm.v33i2.1668>.
5. Raptopoulou C.P. Metal-Organic Frameworks / C.P. Raptopoulou // Synthetic Methods and Potential Applications. – 2021.
6. Khoramian R. Chemical enhanced oil recovery using carbonized ZIF-67 MOFs and sulfonated copolymers at high reservoir temperatures / R. Khoramian, M. Nurmyrza, W. Lee // Chem. Eng. J. Elsevier B.V. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156653>.
7. Advances in metal-organic frameworks for water remediation applications / S. Lal et al // RSC Adv. – 2024. – № 14. – P. 3413–46. <https://doi.org/10.1039/d3ra07982a>.
8. Enhanced reductive removal of aqueous Hg(II) by a novel Pd-Cu-BTC catalyst / N. Nurlan et al // Chem. Eng. J. Elsevier B.V. – 2024. – P. 151276. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151276>.
9. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety / R. Al-Tohamy et al // Ecotoxicol Environ Saf. – 2022. – № 231. – P. 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>.
10. Investigation of Congo Red Toxicity towards Different Living Organisms: A Review / S.I. Siddiqui et al // Processes. – 2023. – № 11. – P. 1-12. <https://doi.org/10.3390/pr11030807>.
11. Anjum A. Adsorption Technology for Removal of Toxic Pollutants / A. Anjum. – 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61146-4_2.

12. Adsorptive removal of Congo red from aqueous solution using zeolitic imidazolate framework-67 / Tu NT Thanh et al // J Environ Chem Eng. – 2018. – № 6. – P. 2269-80. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.031>.
13. Harja M. Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste / M. Harja, G. Buema, D. Bucur // Sci Rep. – 2022. – № 12. – P. 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10093-3>.
14. Sustainable Synthesis of Zeolitic Imidazolate Frameworks at Room Temperature in Water with Exact Zn/Linker Stoichiometry / MA Molina et al // Nanomaterials. – 2024. – № 14. – P. 1-17. <https://doi.org/10.3390/nano14040348>.
15. Qian J. Hydrothermal synthesis of zeolitic imidazolate framework-67 (ZIF-67) nanocrystals / J. Qian, F. Sun, L. Qin // Mater Lett. – 2012. – № 82. – P. 220–3. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.077>.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, BR24992814 «Развитие инновационных технологий и создание современной инфраструктуры для устойчивого развития Южно-Казахстанской области».

А.Т. Табынбаева¹, Қ. Тоштай¹, Н.А. Ахметов², Қ.Т. Тастамбек^{1,2}, Ж.Т. Тауанов^{1,2*}

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,

050038, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Аль-Фараби д.71

²Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави,
161200, Республика Казахстан, г. Туркестан, пр. Б. Саттарханова, 29

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz

СУДЫ КОНГО ҚЫЗЫЛ БОЯҒЫШЫНАН ТАЗАЛАУҒА АРНАЛҒАН МЕТАЛЛ-ОРГАНИКАЛЫҚ КАРКАСТЫҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ СИПАТТАМАСЫ

Бұл мақалада ZIF-8 және ZIF-67 металл-органикалық каркастардың синтезі мен сипаттамасы және олардың су тазалау процесінде қолданылуы қарастырылады. Әсіресе, осы материалдардың конго қызыл бояуын су ерітінділерінен адсорбциялау қасиеттерін зерттеуге баса назар аударылған. Зерттеу нәтижелері металл-органикалық каркастардың органикалық ластағыштарды адсорбциялауда жоғары тиімділігін, олардың ерекше құрылымы, үлкен меншікті беті және реттелетін кеуектілігі арқасында көрсеткенін дәлелдейді. Адсорбциялық сыйымдылық ZIF-8 үшін 74,15 мг/г, ал ZIF-67 үшін 81,27 мг/г құрайды, екі материал да Ленгмор изотермасының моделіне сәйкес келді. Адсорбция кинетикасын зерттеу нәтижелері бойынша, ZIF-67 24 сағат ішінде 53,8% тиімділігін көрсетті, ал ZIF-8 үшін бұл көрсеткіш 46,6% болды. Бұл нәтижелер синтезделген металл-органикалық каркастардың химиялық және экологиялық инженерияда қолданылу әлеуеті жоғары екенін растап, оларды улы заттардан, соның ішінде конго қызылдан, ағынды суларды тазарту үшін перспективті шешімдер ретінде ұсынады.

***Түйін сөздер:** Металл-органикалық каркас, ZIF-8, ZIF-67, конго қызыл, адсорбция, суды тазалау.*

A.T. Tabynbayeva¹, K. Toshtay¹, N.A. Akhmetov², K.T. Tastambek^{1,2}, Z.T. Tauanov^{1,2*}

¹Al-Farabi Kazakh National University,

050038, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi av, 71

²Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
161200, Republic of Kazakhstan, Turkestan, B.Sattarkhanov Ave., 29

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF METAL-ORGANIC FRAMEWORK FOR THE REMOVAL OF CONGO RED DYE FROM WATER

This article discusses the synthesis and structural characteristics of metal-organic frameworks (MOFs), specifically ZIF-8 and ZIF-67, and their potential applications in the removal of toxic organic pollutants from water. These materials belong to the class of porous coordination polymers, which have attracted attention due to their unique crystalline structure, high specific surface area, and potential for tunable porosity and functional groups. Special emphasis is placed on studying the adsorption properties of ZIF-8 and ZIF-67 using the removal of the toxic anionic dye Congo red from aqueous solutions as an example, allowing an

evaluation of their effectiveness as adsorbents. Research has shown that both materials exhibit high adsorption capacities, amounting to 74.15 mg/g for ZIF-8 and 81.27 mg/g for ZIF-67, attributed to the ability of dye molecules to penetrate the porous structure of the frameworks. The adsorption of Congo red corresponds to the Langmuir isotherm model, indicating predominantly monolayer interactions with the adsorbent surface. Kinetic analysis showed that ZIF-67 achieves 53.8% dye removal efficiency in 24 hours, while ZIF-8 achieves 46.6%, confirming the significant potential of these materials in chemical and environmental engineering for effective wastewater treatment.

Key words: Metal-organic framework, ZIF-8, ZIF-67, congo red, adsorption, water purification.

Сведения об авторах

Айдана Талгатовна Табынбаева – магистрант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, кафедра «Химической физики и материаловедения»; e-mail: aidanatabynbaeva1@gmail.com.

Кайнаубек Тоштай – PhD, доцент, кафедра «Физическая химия, катализ и нефтехимия», Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz.

Нурлан Абдурахманович Ахметов – PhD, директор, НИИ Экологии, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави; e-mail: nurlan.akhmetov@ayu.edu.kz.

Куаныш Талгатович Тастамбек – PhD, директор, НИИ Устойчивости экологии и биоресурсов, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: kuanysh.tastambek@kaznu.edu.kz.

Жандос Турегулович Тауанов* – PhD, ассоциированный профессор-исследователь, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz.

Авторлар туралы мәліметтер

Айдана Талгатовна Табынбаева – магистрант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, «Химиялық физика және материалтану» кафедрасы; e-mail: aidanatabynbaeva1@gmail.com.

Кайнаубек Тоштай – PhD, доцент, «Физикалық химия, катализ және мұнай химиясы» кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; e-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz.

Нурлан Абдурахманович Ахметов – PhD, директор, Экология ҒЗИ, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті; e-mail: nurlan.akhmetov@ayu.edu.kz.

Куаныш Талғатұлы Тастамбек – PhD, директор, Экология және биоресурстар тұрақтылығы ҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; e-mail: kuanysh.tastambek@kaznu.edu.kz.

Жандос Турегулович Тауанов* – PhD, доцент-зерттеуші, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті; e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz.

Information about the authors

Aidana Tabynbayeva – Master's student, Department of Chemical Physics and Materials Science, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: aidanatabynbaeva1@gmail.com.

Kainaubek Toshtay – PhD, associate professor, department of «Physical Chemistry, Catalysis and Petrochemistry», Al-Farabi Kazakh National University, e-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz.

Nurlan Akhmetov – PhD, director, SRI Ecology, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University; e-mail: nurlan.akhmetov@ayu.edu.kz.

Kuanysh Tastambek – PhD, director, SRI Sustainability of ecology and bioresources, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: kuanysh.tastambek@kaznu.edu.kz.

Zhandos Tauanov* – PhD, associate professor-researcher, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University; e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz.

Поступила в редакцию 30.10.2024

Поступила после доработки 12.12.2024

Принята к публикации 13.12.2024