

УДК 544.421+54.021

<https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2025.78.206>

Микола КОРОВ'ЯКОВ, Ярослав КОВАЛИШИН, Василь КОРДАН

ГІДРОТЕРМІЧНИЙ СИНТЕЗ ВАНАДАТУ ЗАЛІЗА(ІІІ)

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
бул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна
e-mail: yaroslav.kovalyshyn@lnu.edu.ua*

Виконано синтез ванадатів заліза з водних розчинів за різних співвідношень між реагуючими компонентами за температури 40°C. Досліджено перебіг реакції за різного співвідношення між реагентами. В початковий момент відбувається швидке утворення осаду, після цього реакція сповільнюється і спостерігається поступове зменшення концентрації іонів заліза. Збільшення мольного надлишку ванадату стосовно нітрату заліза в межах 0,5–3 сприяє збільшенню маси отриманих ванадатів заліза та частки атомів Ванадію в них. Додавання лугу до реакційної суміші має наслідком збільшення маси отриманого продукту та зменшення частки атомів Ванадію.

Ключові слова: ванадат заліза, гетерогенна реакція, константа швидкості.

Вступ

Ванадат заліза (FeVO_4) є матеріалом, який завдяки своїм унікальним електрохімічним і каталітичним властивостям застосовується у багатьох сферах. Його використовують для конструкції сенсорів [1], як електроактивний матеріал у електрохімічних джерелах струму [2], суперконденсаторах, каталізатор і фотокатализатор [3, 4], як матеріал, через утворення якого вилучають ванадій з промислових відходів [5], має перспективи застосування в магнітних матеріалах, датчиках [6, 7]. Є багато публікацій присвячених застосуванню ванадату заліза в біохімії та медицині, зокрема як протимікробний препарат [8].

Детально досліджувати ванадат заліза продовжують щоб ліпше розуміти його властивості та можливі застосування, вивчають нові методи його синтезу й обробки. Зокрема, добування наноструктурованих матеріалів, шаруватих або наношаруватих структур можуть поліпшити його електрохімічні властивості шляхом збільшення активної поверхні та поліпшення йонної дифузії [9].

Доволі простим та ефективним методом синтезу FeVO_4 є гідротермічний, він дає змогу отримати FeVO_4 методом осадження з водних розчинів за різних температур і тисків [10, 11]. Процес полягає у додаванні розчинів солей заліза та ванадату у водному середовищі, що супроводжується утворенням осаду ванадату заліза. Цей метод дешевий, простий у виконанні та допомагає контролювати розмір, структуру та морфологію частинок. Зазвичай синтез виконують за температур 90–180 °C [12, 13]. Гідротермічний синтез є ефективним методом для отримання

наноструктурованих ванадатів заліза. Описано гідротермічний синтез наночастинок FeVO_4 із використанням прекурсорів $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, NH_4VO_3 та полівінілпіролідон ($\text{C}_6\text{H}_9\text{NO}_n$) за температури 120°C протягом 6 годин. Отримані наночастинки мали розмір 50–100 нм. Ці наночастинки продемонстрували високу електрохімічну активність. Також гідротермічним методом отримано FeVO_4 із високою питомою поверхнею та контролюваною морфологією, що сприяло підвищенню питомої ємності та стабільності суперконденсаторів при циклах заряду-розряду [14].

Хоча гідротермічний синтез є ефективним методом, в нього є ряд недоліків. За високих температур або тривалому синтезі наночастинки FeVO_4 можуть агломеруватися, що знижує їхню питому поверхню. Також під час гідротермічного синтезу FeVO_4 можуть утворюватися побічні фази, такі як оксиди ванадію (V_2O_5) або заліза, через неоптимальні значення pH, температури чи співвідношення прекурсорів. Тому подальші дослідження цього методу дають підстави робити відтворювані й ефективні методи синтезу для отримання ванадатів заліза з цільовими властивостями для конкретних застосувань [15].

Матеріали та методика експерименту

Для приготування розчинів використовували нітрат заліза (ІІІ) $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (чда), ванадат натрію $\text{NaVO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (чда), натрію гідроксид NaOH (хч) та дистильовану воду. Готовали вихідні розчини таких концентрацій: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 - 0,1 \text{ M}$, $\text{NaVO}_3 - 0,4 \text{ M}$, $\text{NaOH} - 0,2 \text{ M}$.

Приготували сім розчинів, об'єми розчинів вихідних сполук наведено в табл. 1. До розчину ванадату натрію за температури 40°C додавали відповідні кількості лугу та води. Надалі зливали 15 мл утвореного розчину з 15 мл розчину нітрату Феруму. Після завершення синтезу осаді відфільтрували, багатократно промили дистильованою водою, висушили у вакуумній пічці за температури 140°C . Маси синтезованих ванадатів подано у табл. 1.

Для визначення складу синтезованих зразків використовували енергодисперсійний рентгенівський мікроаналізатор Oxford Instruments Aztec ONE з детектором X-MaxN20.

Крім того, було досліджено залежність концентрації йонів заліза від часу проходження реакції. Для цього через певні проміжки часу відбирали проби реакційної суміші, відфільтровували осад і визначали у фільтраті концентрацію йонів заліза (ІІІ). Визначення проводили згідно з методикою, описаною в [16], вимірюючи оптичну густину розчинів за допомогою фотоколориметра КФК-2МП. Використовували світлофільтр з довжиною хвилі 490 нм. Для побудови калібрувального графіка використали стандартний зразок розчину солі заліза. Лінійна залежність оптичної густини від концентрації спостерігається в діапазоні концентрацій від 0,00 до 5,00 мг/л. Під час дослідження кінетики синтезу ванадату заліза відібрани проби фільтрату розбавляли так, щоб значення оптичної густини аналізованого розчину потрапляло в середню частину лінійної ділянки калібрувальної кривої.

Результати та обговорення

В усіх випадках після змішування реагуючих компонентів спостерігалось утворення дрібнодисперсних частинок твердої фази жовтого кольору. Під час проходження процесу розчини періодично (1 раз на добу) перемішували. Вигляд реакційної суміші через різні інтервали часу зображене на рис. 1. З часом колір

осаду в ряді трубок Уїкена змінювався з жовтого на відтінки коричневого, які притаманні ванадатам заліза. Зміна забарвлення може свідчити про зміни фазового й агрегатного стану утворених у початковий момент осадів.

Таблиця 1

Приготування вихідних розчинів, маса та склад отриманого продукту

Table 1

Preparation of starting solutions, mass and composition of the obtained product

Номер р-ну.	1	2	3	4	5	6	7
V ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, мл.)	15	15	15	15	15	15	15
V (NaVO_3), мл.	3,75	3,75	1,87	3,75	7,5	11,25	15
V (NaOH), мл.	7,5	3,75	-	-	-	-	-
V (H_2O), мл.	3,75	7,5	13,12	11,25	7,5	3,75	-
Мольне відношення Fe:V	1:1	1:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4
Маса отриманого осаду, г	0,3012	0,2686	0,1102	0,2346	0,4673	0,5052	0,5925
Вміст (ат. %):							
Fe	16,07	18,21	17,37	4,72	4,74	7,06	9,97
V	16,08	23,61	19,15	7,18	9,98	18,23	19,09
O	67,85	58,18	63,48	88,10	85,28	74,71	70,94
Формула	$\text{FeV}_{1,00}\text{O}_{(4,22)}$	$\text{FeV}_{1,30}\text{O}_{(3,19)}$	$\text{FeV}_{1,10}\text{O}_{(3,65)}$	$\text{FeV}_{1,52}\text{O}_{(18,67)}$	$\text{FeV}_{2,11}\text{O}_{(17,99)}$	$\text{FeV}_{2,58}\text{O}_{(10,58)}$	$\text{FeV}_{1,91}\text{O}_{(7,12)}$
Теоретичний вихід FeVO_4 , г	0,2562	0,2562	0,1278	0,2562	0,2562	0,2562	0,2562
Теоретичний вихід $\text{Fe}_4\text{V}_6\text{O}_{21}$, г	0,2163	0,2163	0,1079	0,2163	0,3244	0,3244	0,3244
Теоретичний вихід $\text{Fe}_2\text{V}_4\text{O}_{13}$, г	0,1963	0,1963	0,0979	0,1963	0,3926	0,3926	0,3926
Теоретичний вихід FeV_3O_9 , г	0,1763	0,1763	0,0879	0,1763	0,3527	0,529	0,529

Отримані результати свідчать про те, що збільшення мольного надлишку ванадату або збільшення pH розчину сприяє збільшенню кількості продукту (табл. 1). Збільшення мольного співвідношення $\text{NaVO}_3 : \text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ в межах 0,5 – 4 (зразки 3–7), призводило до збільшення маси отриманих продуктів. Судячи з мас отриманих осадів, можна передбачити утворення за цих умов ди- та триванадатів заліза. Це підтверджується збільшенням частки атомів Ванадію у зразках 3–6, хоча у зразку 7 ця частка починає зменшуватись. Пояснити такі результати можна тим, що у розведених розчинах ванадату натрію утворюватимуться іони H_2VO_4^- та HVO_4^{2-} , які зі збільшенням концентрації розчину переходитимуть у VO_4^{3-} . За малої концентрації NaVO_3 та, відповідно, малого його мольного надлишку, кількості відповідних іонів недостатньо для утворення ди- та триванадатів. Збільшення концентрації призводить до загального збільшення концентрації іонів H_2VO_4^- (HVO_4^{2-}), їхня кількість стає достатньою для утворення ди- та триванадатів.

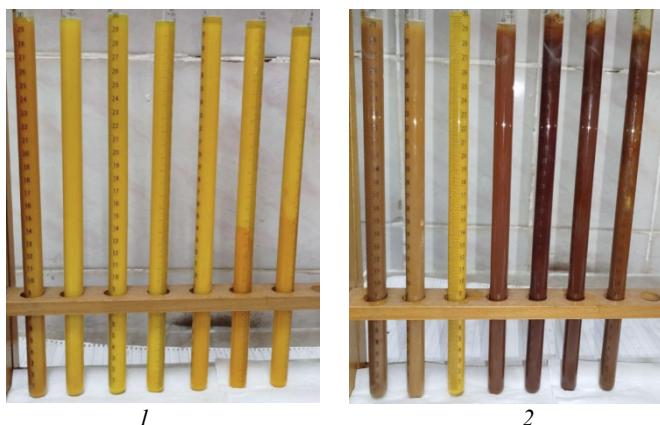


Рис. 1. Зміна вигляду реакційних сумішей:
1 – одразу після змішування; 2 – через 5 діб після початку синтезу.

Fig. 1. Change in appearance of reaction mixtures after:
1 – immediately after mixing; 2 – 5 days after the start of synthesis.

Подальше збільшення концентрації призводить до збільшення частки іонів VO_4^{3-} , що сприятиме утворенню ортованадату і зменшенню частки атомів Ванадію у продукті. Варто зазначити, що для зразків 4, 5 та, деякою мірою, 6 спостерігається великий надлишок атомів Оксигену. Причому збільшення мольного надлишку ванадату призводить зменшення частки атомів Оксигену в продукті. Це можна пояснити збільшенням ступеня гідратації відповідних аніонів зі зменшенням концентрації NaVO_3 . Молекули води гідратної оболонки, очевидно, залишатимуться міцно зв'язаними з утвореним продуктом і не видалятимуться у заданому режимі висушування. Тому продукти, отримані з розбавлених розчинів ванадату натрію, будуть містити додаткову кількість атомів Оксигену. Збільшення концентрації NaVO_3 призводитиме до зменшення ступеня гідратації та, відповідно, зменшення вмісту Оксигену у синтезованих зразках. Додатковим доказом цього є більші маси отриманих осадів порівняно з теоретичними (табл. 1).

Вихідні суміші 1, 2 та 4, які містять еквімолярні кількості NaVO_3 та $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, відрізняються кількістю доданого гідроксиду натрію (табл. 1). Збільшення кількості доданого лугу має наслідком збільшення маси отриманого продукту та зменшення частки атомів Ванадію у ньому. Ці результати зумовлені також переходом іонів $\text{H}_2\text{VO}_4^{2-}$ та HVO_4^{2-} у VO_4^{3-} при додаванні NaOH .

Енергодисперсійний рентгенівський аналіз (рис. 2) виявив, що всі зразки гомогенні, в них відсутні частки, які б відрізнялися фазовим складом.

Залежність концентрацій іонів заліза в розчині від часу синтезу зображено на рис. 3. У початковий момент реакції концентрація іонів заліза в розчині стрибкоподібно зменшується, далі протягом 1 год спостерігається ще поступове незначне зменшення концентрації. В подальшому концентрація суттєво не змінюється. У випадку вихідних розчинів 3 та 4, для яких отримано найменші кількості продуктів, спостерігаються найвищі значення концентрацій. У розчинах 1 та 2, які містили луг, для часів реакції більших за 1 год концентрації Fe^{3+} практично не відрізняються. Для систем 3 – 7 за часів реакції більших за 1 год спостерігається обернений

взаємозв'язок між вмістом атомів Ванадію в осаді та концентрацією іонів заліза в розчині.

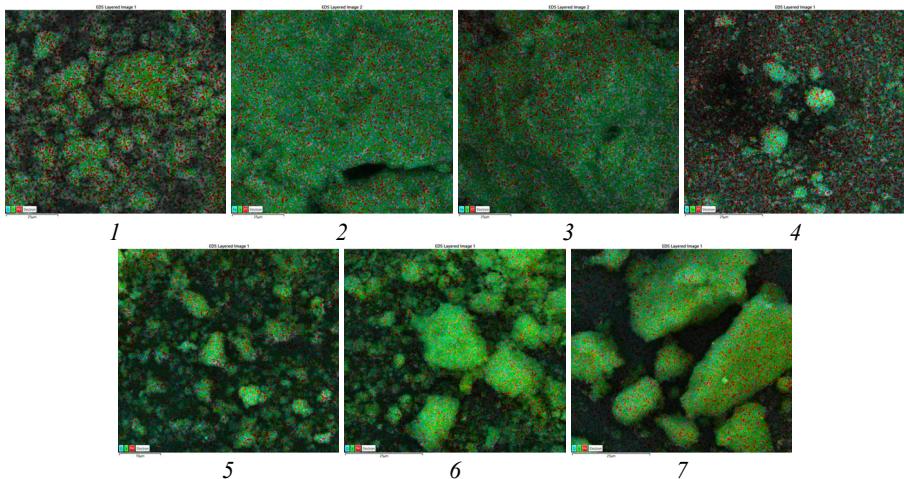


Рис. 2. EDS зображення синтезованих зразків (номер рисунка відповідає номеру зразка).
Fig. 2. EDS images of synthesized samples (the figure number corresponds to the sample number).

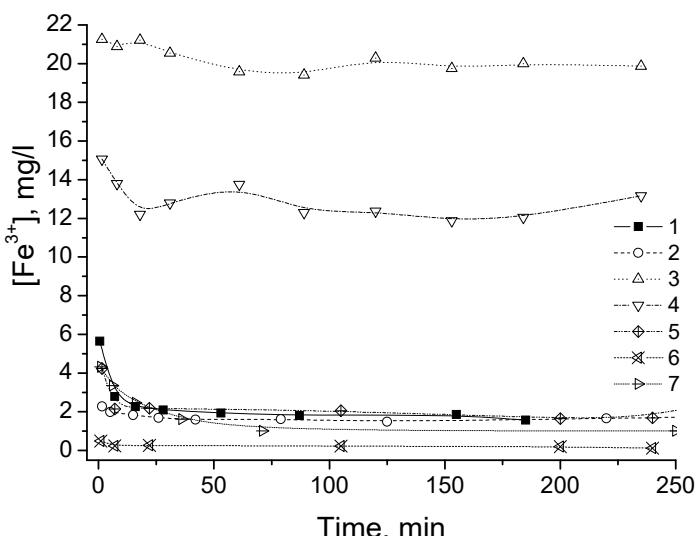


Рис. 3. Залежність концентрації іонів Fe^{3+} від часу реакції (номер ліній відповідає номеру реакційної суміші).
Fig. 3. Dependence of the concentration of Fe^{3+} ions on the reaction time (line number corresponds to reaction mixture number).

Було проаналізовано залежності концентрації йонів Fe^{3+} від часу у координатах $C-\tau$, $\ln C-\tau$, $1/C-\tau$ та $1/C^2-\tau$. На підставі аналізу було розраховано константи швидкостей k для різних порядків реакції (моль $\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{xv}^{-1}$, xv^{-1} , моль $^{-1}\cdot\text{l}\cdot\text{xv}^{-1}$, моль $^{-2}\cdot\text{l}^2\cdot\text{xv}^{-1}$, відповідно, для нульового, першого, другого та третього) і коефіцієнти кореляції (R) при побудові відповідних лінійних залежностей. Результати розрахунків наведено в табл. 2. Чітких лінійних залежностей не було отримано, про що свідчать низькі значення коефіцієнтів кореляції в більшості випадків. Такий факт можна пояснити складністю процесу – у взаємодію можуть вступати ванадат-іони у різних формах, а також реакція супроводжуватиметься агрегацією та збільшенням розміру частинок ванадату заліза.

Таблиця 2

Результати розрахунків ефективних констант швидкостей взаємодії

Table 2

Results of calculations of effective interaction rate constants

	Розчин 1							
Порядок реакції	0	0	1	1	2	2	3	3
	k	R	k	R	k	R	k	R
	0,02861	0,63107	0,00914	0,7138	$3,25 \cdot 10^{-3}$	0,80084	$2,52 \cdot 10^{-3}$	0,87511
Розчин 2								
Порядок реакції	0	0	1	1	2	2	3	3
	k	R	k	R	k	R	k	R
	0,00483	0,78	0,00263	0,81	$1,45 \cdot 10^{-3}$	0,84	$1,62 \cdot 10^{-3}$	0,87
Розчин 3								
Порядок реакції	0	0	1	1	2	2	3	3
	k	R	k	R	k	R	k	R
	0,02251	0,95	0,0011	0,96	$5,40 \cdot 10^{-5}$	0,96	$5,30 \cdot 10^{-6}$	0,96
Розчин 4								
Порядок реакції	0	0	1	1	2	2	3	3
	k	R	k	R	k	R	k	R
	0,01319	0,66	$9,86 \cdot 10^{-4}$	0,67	$7,40 \cdot 10^{-5}$	0,68	$1,12 \cdot 10^{-5}$	0,68
Розчин 5								
Порядок реакції	0	0	1	1	2	2	3	3
	k	R	k	R	k	R	k	R
	0,00242	0,96	0,00125	0,96	$6,45 \cdot 10^{-4}$	0,95	$6,72 \cdot 10^{-4}$	0,95
Розчин 6								
Порядок реакції	0	0	1	1	2	2	3	3
	k	R	k	R	k	R	k	R
	0,0019	0,98	0,01361	0,98	0,105	0,97	1,72	0,95
Розчин 7								
Порядок реакції	0	0	1	1	2	2	3	3
	k	R	k	R	k	R	k	R
	0,0124	0,82	0,00779	0,92	$6,49 \cdot 10^{-3}$	0,95	0,0137	0,92

Відповідно, буде зменшуватись площа поверхні поділу фаз, що вестиме до зменшення швидкості процесу. Такий висновок узгоджується з візуальними спостереженнями, коли на пізніх етапах процесу спостерігалась вища швидкість осідання осаду. В більшості випадків найбільші коефіцієнти кореляції спостерігаються для залежностей $1/C^2-t$, що відповідає кінетичному порядку, який дорівнює трьом. Для цього випадку можна відзначити тенденцію до збільшення константи швидкості реакції при додаванні гідроксиду натрію або зі збільшенням мольного надлишку ванадату заліза.

Висновки

Досліджено синтез ванадатів заліза з водних розчинів за різних співвідношень між реагуючими компонентами за температури $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Встановлено, що збільшення мольного надлишку ванадату стосовно нітрату заліза в межах 0,5–3 сприяє збільшенню маси отриманих ванадатів заліза та частки атомів Ванадію в них. Збільшення кількості доданого лугу має наслідком збільшення маси отриманого продукту та зменшення частки атомів Ванадію. В початковий момент реакції концентрація іонів заліза в розчині стрибкоподібно зменшується, далі протягом 1 год спостерігається ще поступове незначне зменшення концентрації. Розраховано константи швидкостей для різних порядків реакції та коефіцієнти кореляції при побудові відповідних лінійних залежностей. Чітких лінійних залежностей не було отримано, про що свідчать низькі значення коефіцієнтів кореляції в більшості випадків. Такий факт можна пояснити складністю процесу – у взаємодію можуть вступати ванадат-іони у різних формах, а також реакція супроводжується агрегацією та збільшенням розміру частинок ванадату заліза.

Подяка

Подані у цій статті результати досліджень отримано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (номер державної реєстрації держбюджетної теми: 0123U101857 “Фізико-хімія функціональних наноматеріалів для електрохімічних систем”).

This work was partly supported by the Simons Foundation (Award Number: PD-Ukraine-00014574).

ЛІТЕРАТУРА

1. Rajaji U., Kumar Y. K., Chen, S.M. et al. Deep eutectic solvent synthesis of iron vanadate-decorated sulfur-doped carbon nanofiber nanocomposite: electrochemical sensing tool for doxorubicin. *Microchim Acta*. 2021. Vol.188. P. 303(1–13). <https://doi.org/10.1007/s00604-021-04950-7>.
2. Munseok S. Ch., Setiawan D., Kim H. J. Hong S.-T. Layered Iron Vanadate as a High-Capacity Cathode Material for Nonaqueous Calcium-Ion Batteries. *Batteries*. 2021. Vol. 7(3). P. 54(1–9). <https://doi.org/10.3390/batteries7030054>.
3. Routray K., Zhou W., Kiely Ch. J., Wachs I. E. Catalysis Science of Methanol Oxidation over Iron Vanadate Catalysts: Nature of the Catalytic Active Sites. *ACS Catal.* 2011. Vol. 1. P. 54–66. <https://doi.org/10.1021/cs1000569>.
4. Lu Hao, Ji Li, Xinxing Wang, et al. Electrospun FeVO₄ nanofibers-based gas sensor with high selectivity and fast-response towards n-butanol. *Sens. Actuators B Chem.* 2025. Vol. 433. P. 137515. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.137515>.

5. Chen L., Liu F., Li D. Precipitation of crystallized hydrated iron (III) vanadate from industrial vanadium leaching solution. *Hydrometallurgy*. 2011. Vol. 105 (3–4). P. 229–233. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.10.002>.
6. Khajonrit, J., Sichumsaeng, T., Kidkhunthod, P. et al. Enhancing electrochemical performance and magnetic properties of FeVO₄ nanoparticles by Ni-doping: The role of Ni contents. *Int J Miner Metall Mater* 2025. Vol. 32. P 944–953. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-3019-0>.
7. Cirong Wang, Chuanyu Jin, Ting Wang et al. Efficient synthesis of FeVO₄ cathode materials in high specific energy thermal batteries. *Mater. Lett.* 2025. Vol. 378. P.137637. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137637>.
8. Adeniyi K. O., Osmanaj B., Manavalan G., Samikannu A., Mikkola J.-P., Avni B., Boily J.-F., Tesfalidet S. Engineering of layered iron vanadate nanostructure for electrocatalysis: Simultaneous detection of methotrexate and folinic acid in blood serum. *Electrochim. Acta*. 2023. Vol. 458 (1). P. 142538. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142538>.
9. Mosleh M. Nanocrystalline iron vanadate: facile morphology-controlled preparation, characterization and investigation of optical and photocatalytic properties. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2017. Vol. 28. P. 5866–5871. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-6259-6>.
10. Poizot Ph., Laruelle S., Touboul M., Tarascon J.-M. Wet-chemical synthesis of various iron (III) vanadates (V) by co-precipitation route. *C. R. Chimie*. 2003. Vol. 6. P. 125–134. [https://doi.org/10.1016/S1631-0748\(03\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S1631-0748(03)00015-8).
11. Huang L., Shi L., Zhao X., Xu J., Li H., Zhang J., Zhang D. Hydrothermal growth and characterization of length tunable porous iron vanadate one-dimensional nanostructures. *Cryst. Eng. Comm.* 2014. Vol. 16. P. 5128–5133. <https://doi.org/10.1039/C3CE42608D>.
12. Kesavan G., Pichumani M., Chen Sh.-M. Influence of Crystalline, Structural, and Electrochemical Properties of Iron Vanadate Nanostructures on Flutamide Detection. *ACS Appl. Nano Mater.* 2021. Vol. 4 (6). P. 5883–5894. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00802>.
13. Patoux S., Richardson T. J. Lithium insertion chemistry of some iron vanadates. *Electrochim. Comm.* 2007. Vol. 9(3). P. 485–491. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2006.10.006>.
14. Ganesh Kesavan, Moorthi Pichumani, Shen-Ming Chen , Chia-Jung Wu. Hydrothermal Synthesis of Iron Vanadate Nanoparticles for Voltammetric Detection of Antipsychotic Drug Thioridazine. *J. Alloys Compd* 2021. Vol. 885. P. 160880. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160880>.
15. Yan Yan, Bing Li, Wei Guo, et. al. Vanadium based materials as electrode materials for high performance supercapacitors. *J. Power Sources*. 2016. Vol. 329. P. 148–169. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.039>.
16. KND 211.1.4.040-95 Method of photometric determination of iron (III) and iron (II, III) with sulfosalicylic acid in wastewater (in Ukrainian).

SUMMARY

Mykola KOROVIAKOV, Yaroslav KOVALYSHYN, Vasyl KORDAN

HYDROTHERMAL SYNTHESIS OF IRON(III) VANADATE

*Ivan Franko National University of Lviv,
Kyryla i Mefodia Str., 6, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: yaroslav.kovalyshyn@lnu.edu.ua*

Samples with luminescent properties are of interest for research purposes. Series of clinoptilolite samples doped with mono-, di-, and trivalent metal cations were analyzed in order to compare the biological effects of its doping with silver cations and other metals, in particular REE, on substrate-dependent (attached to surface) mammalian cells with different degree of the neoplastic transformation, as well as regarding the bacterial cells.

The goal of the study was to obtain samples of clinoptilolite doped with REE cations suitable (low cytotoxicity) for interaction with cellular units in a liquid microenvironment.

It was shown that luminescent REE (the most intense effects were observed in the case of Tb^{3+} [1] and Er^{3+}) that were present in the zeolite structure changed their spectral characteristics upon interaction/binding with cellular units. That allowed real-time monitoring of their interaction via detection of luminescence (change in intensity level and appearance of new peaks). Luminescently active samples with a low cytotoxic effect were obtained, with an exception of silver-doped samples that were used to compare REE-doped clinoptilolites with different properties (biotolerant or cytostatic), in relation to bacterial, yeast and mammalian cells with different levels of neoplastic transformation [1–3]. It was found that the order of magnitude increase in emission intensity in the long-wave spectrum region took place in case of erbium application. This phenomenon will be studied in our further research.

The obtained results are the basis for the creation and manufacture of systems for separation or capture of biological (cell and macromolecules) units in technological devices for cleaning and conditioning liquids. In particular, there are significant prospects for the use of the obtained samples of clinoptilolites doped with REE for the further development of working surfaces for the immobilization of functional determinants (for example, recombinant enzymes) at the creation of medical equipment.

Keywords: iron vanadate, heterogeneous reaction, rate constant.

Стаття надійшла: 03.07.2025.

Після доопрацювання: 29.07.2025.

Прийнята до друку: 26.09.2025.