

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ТОВАРІВ

УДК 628.161:546.726 DOI: [https://doi.org/10.31617/tr.knute.2020\(34\)06](https://doi.org/10.31617/tr.knute.2020(34)06)

Дмитро ГОЛОВКО

E-mail: olimp17tnv@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0379-083X

к. х. н., доцент кафедри
технології неорганічних речовин та екології
Українського державного
хіміко-технологічного університету
просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна

Ірина ГОНЧАРОВА

E-mail: i.goncharova@knute.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7867-9154

к. х. н., доцент кафедри товарознавства,
управління безпечністю та якістю
Київського національного
торговельно-економічного університету
вул. Кіото, 19, м. Київ, 02156, Україна

Ярослав БАРАШОВЕЦЬ

E-mail: cws@cws.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-1618-2342

генеральний директор
ТОВ "Системи чистої води"
вул. Пирогова, 2/37, м. Київ, 01030, Україна

ФЕРАТНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИЩЕННЯ ПРИРОДНИХ ВОД

Проаналізовано методи знезалізнення води природних джерел. Методом спектрофотометрії встановлено вміст загального Феруму в модельних розчинах та зразках бюветної води Деснянського району м. Києва. Розраховані термодинамічні та кінетичні характеристики реакцій взаємодії сполук Феруму(II) з калій фератом. Проведено очищення зразків від йонів Феруму за допомогою калій ферату(VI) та активованого вугілля. Обґрунтовано перспективність фератної технології очищення води від сполук Феруму.

Ключові слова: природні води, якість, безпечність, сполуки Феруму, калій ферат(VI), методи знезалізнення води, фератна технологія.

Головко Д., Гончарова И., Барашовец Я. Ферратная технология очистки природных вод. Проанализированы методы обезжелезивания воды природных источников. Методом спектрофотометрии установлено содержание общего железа в модельных растворах и образцах бюветной воды Деснянского района г. Киева. Рассчитаны термодинамические и кинетические характеристики реакций взаимодействия соединений железа(II) с ферратом калия. Проведена очистка образцов от ионов железа с помощью феррата(VI) калия и активированного угля. Обоснована перспективность ферратной технологии очистки воды от соединений железа.

Ключевые слова: природные воды, качество, безопасность, соединения железа, феррат(VI) калия, методы обезжелезивания воды, ферратная технология.

© Дмитро Головко, Ірина Гончарова, Ярослав Барашовець, 2020

Постановка проблеми. Сьогодні якісна вода є одним із найважливіших товарів, вартість якого на світових ринках має тенденцію до постійного зростання. Водночас існує значний ресурс природних вод із артезіанських свердловин, які мають низку переваг проти звичайної водопровідної води [1; 2]. За більшістю показників бюветна вода відповідає вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 [3] і в деяких випадках характеризується підвищеним вмістом гідроген сульфідів, сульфатів, хлоридів, карбонатів, йонів OH^- , сполук важких металів, зокрема Мангану і Феруму, що потребує її додаткового очищення.

Ферум є компонентом багатьох природних мінералів і порід й міститься у підземних водах у вигляді двох- і тривалентних йонів, зокрема Fe^{2+} , Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, колоїдів $\text{Fe}(\text{OH})_3$, FeS , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, комплексних сполук з гумату та фульвокислот [4]. Переважною формою існування Феруму в підземних водах є ферум(II) гідрокарбонат, який стійкий лише за наявності великих кількостей вуглекислоти та відсутності розчиненого кисню. Сполуки Феруму(III) в артезіанській воді містяться у складі комплексних йонів, оскільки Fe^{3+} має сильно виражену здатність до комплексоутворення [5].

Згідно із санітарними нормами [3] у питній бюветній воді Феруму має бути не більше ніж 0.2 мг/дм^3 . Підвищений вміст йонів Феруму додає їй іржавого кольору і металевого присмаку. Сполуки Феруму відкладаються в органах і тканинах, що може призвести до порушення функції слизової оболонки шлунка, серцево-судинної й ендокринної систем, розвитку алергічних реакцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Видалення сполук Феруму з артезіанської або водопровідної води є однією зі складних проблем у водоочищенні [2; 5; 6]. Усі методи знезалізнення (деферизації) води можна поділити на фізичні та хімічні. Фізичні дають змогу вилучити йони Fe^{2+} з води без зміни ступеня окиснення, на основі сорбційних, йонообмінних, мембранних технологій [7–14]. Хімічні, або реагентні, методи базуються на окисненні йонів Fe^{2+} до Fe^{3+} різними окисниками з подальшим осадженням і фільтрацією осаду ферум(III) гідроксиду [15–21].

Розглядаючи фізичні методи, варто зазначити, що застосування йонообмінних та мембранних технологій видалення Феруму обмежене наявністю у воді осаду $\text{Fe}(\text{OH})_3$, який забиває пори катіоніту і мембран, що призводить до зниження йонообмінної здатності та вимагає заміни мембран [7]. До того ж це доволі дорогі технології.

У науковій літературі описані методи поглинання йонів Феруму різними сорбентами, а саме: активованим вугіллям [8; 9], піролюзитом [10], бруситом [11], магнетитом та модифікованою ним йонообмінною смолою [12; 13], лігноцелюлозним сорбентом зі шкаралупи волоського горіха [14].

Водночас застосування сорбційних методів пов'язане з необхідністю періодичної заміни сорбенту та його регенерації, що зумовлює збільшення собівартості процесу знезалізнення води.

Для застосування хімічних методів основним є раціональний вибір окисника йонів Fe^{2+} , його доступність, вартість та питома витрата, що визначає собівартість процесу очищення води від сполук Феруму.

Відомо застосування багатьох окисників, а саме: озону, гідроген пероксиду, кисню повітря, калій перманганату, хлору, хлор(IV) оксиду [15–19]. Найкращі окиснювальні властивості з них виявляють озон та гідроген пероксид [17]. Низка праць присвячена очищенню води від Феруму киснем повітря [16; 17]. Однак, зважаючи на низьку розчинність кисню у воді, метод аерації не набув широкого застосування. Досить поширеними є мангановмісні окисники, які зазвичай наносять на поверхню фільтрувального завантаження [18].

Більшість із наведених окисників є порівняно дорогими, що зумовлює високу собівартість процесу очищення води від йонів Феруму. Крім того, під час застосування Cl_2 або ClO_2 як окисників виникає небезпека утворення хлорорганічних сполук, які негативно впливають на якість очищеної води [19].

Відомо також, що знезалізнення невеликих кількостей води з вмістом Феруму(II) понад 10 мг/дм^3 здійснюють методом електрокоагуляції з використанням розчинних анодів, виготовлених зі сталі або алюмінію [20; 21]. Під дією електричного струму відбувається розчинення електродів з утворенням коагулянтів $Fe(OH)_3$ та $Al(OH)_3$, на поверхні яких адсорбуються йони Феруму. Але для реалізації цього методу необхідні значні затрати на спорудження технологічних ліній очищення води й електроенергію. Крім того, використання сталевих електродів збільшує кольоровість і зменшує прозорість води, що негативно впливає на її якість.

Як альтернатива наявним методам очищення питної води від сполук Феруму запропонована фератна технологія її обробки, що належить до реагентних способів очищення універсальної дії. Суть її полягає у використанні сполук $Fe(VI)$ (переважно фератів лужних або лужноземельних металів), за допомогою яких розв'язують цілий комплекс водоочисних завдань.

Мета роботи – доведення можливості застосування фератної технології для видалення сполук Феруму із природних вод на основі дослідження термодинамічних і кінетичних закономірностей реакцій Феруму(II) різної природи з калій фератом(VI), порівнюючи її з адсорбційним очищенням вугіллям.

Матеріали та методи. Об'єкт дослідження – модельні розчини, що містять розчинні й нерозчинні прості солі, суспензії або колоїдні форми Феруму та зразки природних вод з бюветів Деснянського району м. Києва, в яких концентрація загального Феруму перевищувала граничнодопустимі концентрації (ГДК) [3].

Вміст сполук Феруму до та після очищення за фератною технологією й адсорбції вугіллям визначено спектрофотометричним методом, який базується на утворенні червоно-фіолетової комплексної

сполуки Феруму з сульфосаліциловою кислотою. Залежно від рН утворюються комплекси різного забарвлення: червоно-фіолетовий (рН 1.8–2.5), червоний (рН 4–6) та жовтий (рН 8–11) [22].

Досліди проведено в області рН 1.8–2.5 на спектрофотометрі *Specord 210* компанії *Analytik Jena* за довжини хвилі 510 нм.

Для отримання модельних розчинів і суспензій використано воду, що пройшла дві стадії дистиляції, і сполуки Феруму: х.ч. – $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ та ч.д.а. – $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, FeS , FeCO_3 . Для всіх модельних проб концентрація Феруму становила 1.0 мг/дм^3 .

Видалення йонів Феруму з модельних розчинів та зразків бюветної води проведено за фератною технологією [23; 24], синтез кристалічного калій ферату(VI) здійснено відповідно до рекомендацій [25], концентрацію аніону FeO_4^{2-} визначено за [26], адсорбційне очищення досліджуваних зразків – за [9] з використанням активованого вугілля марки *NORIT SA4 PAH (Нідерланди)*.

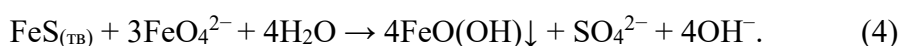
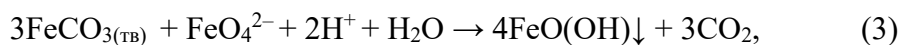
Дослідження фазового складу одержаних осадів, що містять сполуки Феруму, здійснювали з використанням рентгенівського дифрактометра *ДРОН-2.0*.

Під час застосування фератної технології свіжий розчин K_2FeO_4 додавали порціями по 5 см^3 до 100 см^3 модельного розчину із залізовмісним полютантом або бюветної води, перемішували за допомогою магнітної мішалки за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Проби витримували 30–60 хв, осад $\text{FeO}(\text{OH})$ видаляли фільтрацією і визначали залишковий вміст сполук Феруму.

У процесі адсорбційного очищення зразків наважку активованого вугілля 0.2 г додавали до 50 см^3 модельного розчину або бюветної води за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Після проведення адсорбції впродовж 10 хв фільтрацією видаляли осад $\text{FeO}(\text{OH})$ та проводили аналіз на вміст йонів Феруму.

Результати дослідження. Відомо, що в природній воді існує досить багато різних форм Феруму [4]. Для модельних експериментів обрані їхні типові представники, присутність яких в реальних умовах найбільш ймовірна. На першому етапі досліджень експерименти проведено зі сполуками $\text{Fe}(\text{II})$. Як розчинні солі досліджено розчини FeSO_4 , FeCl_2 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$, як нерозчинні – суспензії $\text{Fe}(\text{OH})_2$, FeCO_3 та FeS .

Зважаючи на високу окиснювальну здатність аніону FeO_4^{2-} , можна припустити, що в системі відбуваються такі хімічні реакції:



За своїм типом взаємодія Fe(VI) з Fe(II) може бути віднесена до типових реакцій конпропорціонування. Стосовно термодинамічної ймовірності здійснення реакцій (1) – (4) та повноти окиснення сполук Fe(II), судження виносили за значеннями зміни стандартної енергії Гіббса (ΔG^0_{298}) і величин стандартної константи рівноваги (K^0), які розраховували на основі стандартних значень теплот утворення $\Delta H^0_{298, f}$ та ентропій S^0_{298} для речовин, що входять у рівняння відповідних реакцій:

$$\Delta G^0_{298} = \Delta H^0_{298, f} - T\Delta S^0_{298}, \quad (5)$$

$$\ln K^0 = -\Delta G^0_{298}/RT, \quad (6)$$

де T – температура, К;

R – універсальна газова стала, 8.314 Дж/моль·К.

Результати розрахунків щодо цих рівнянь представлено в *табл. 1*.

Таблиця 1

**Термодинамічні характеристики
реакцій взаємодії сполук Феруму(II) з FeO_4^{2-}**

Термодинамічні характеристики	Реакція			
	1	2	3	4
ΔG^0_{298} , кДж	-424.04	-503.2	-578.21	-1306.5
$\ln K^0$	171.15	203.1	233.4	527.3

Відповідно до розрахунків розглянуті реакції термодинамічно можливі ($\Delta G^0 \ll 0$) та їх рівновага має бути істотно зміщена в бік продуктів реакції, на що вказують високі значення K^0 . Ці висновки знайшли експериментальне підтвердження як для розчинних, так і для нерозчинних сполук Феруму(II).

Встановлено, що гомогенне окиснення істинних розчинів солей Феруму відбувається досить швидко – так порційне додавання свіжого розчину K_2FeO_4 до досліджуваної проби приводило до зникнення фіолетового забарвлення протягом декількох секунд. Точка еквівалентності, зафіксована методом потенціометричного титрування [26], відповідала мольному співвідношенню $\text{Fe(II)/FeO}_4^{2-} \approx 3:1$, що підтверджує справедливість протікання реакцій за рівнянням (1). За декілька хвилин у системі зафіксовано утворення об'ємного осаду рудого кольору, FeO(OH) , час формування якого залежить від загальної концентрації Феруму в системі. Зареєстровано, що ступінь перетворення хлориду, сульфату і нітрату Fe(II) дорівнює $\sim 100\%$.

Із помітно меншою швидкістю відбувався перехід Fe(II) в Fe(III) під час окиснення нерозчинних сполук Феруму. З'ясовано, що він залежав від температури, інтенсивності перемішування та питомої поверхні

залізовмісних реагентів. У процесі гетерогенних реакцій (2) – (4) забарвлення аніону ферату зникало вже протягом декількох хвилин.

За детального вивчення стехіометрії досліджуваних реакцій виявлено деякі відхилення (табл. 2), які можуть вказувати на протікання також інших реакцій у системі за участю як Fe(II), так і Fe(VI).

Таблиця 2

Стехіометрія реакцій взаємодії сполук Феруму(II) з калій фератом(VI)

Полютант	Співвідношення Fe(II)/Fe(VI)	
	теоретичне	експериментальне
FeCl ₂	3:1	3:1.05
FeSO ₄	3:1	3:1.07
Fe(NO ₃) ₂	3:1	3:1.03
Fe(OH) ₂	3:1	3:1.20
FeCO ₃	3:1	3:1.40

Аналіз даних свідчить, що експериментальне мольне співвідношення компонентів відрізняється від теоретичного в бік більшої витрати калій ферату. До того ж розбіжності виявляються більшою мірою для нерозчинних сполук Fe(II), тоді як для розчинів солей вони близькі до теоретичних. Для пояснення таких відхилень варто враховувати, що разом із протіканням основних реакцій (1) – (4) відбувається самовільне розкладання калій ферату за паралельних процесів. Водночас кисень, який виділяється в побічних реакціях, бере участь в окисненні Fe(II) до Fe(III) з утворенням ферум оксигідроксиду:



що певною мірою знижує непродуктивні витрати K₂FeO₄. Крім того, під час реакцій розкладання калій ферату(VI) відбувається збільшення рН розчину, що має позитивно позначатися на формуванні осадів не тільки ферум оксигідроксиду, але й гідроксидів інших важких металів.

У процесі експериментів з модельними розчинами в деяких випадках зафіксовано утворення осадів FeO(OH) із домішкою важкої фракції чорного кольору, яка ідентифікована за допомогою рентгенофазового аналізу як магнетит Fe₃O₄. Утворення магнетиту з виходом до 9% спостерігалось переважно у разі нерозчинних полютантів (FeCO₃, FeS і Fe(OH)₂). Накопичення в системі Fe₃O₄ є позитивним явищем для водоочищення, оскільки такі осад легше фільтруються, до того ж витрачається менша кількість калій ферату(VI).

На наступному етапі досліджень експерименти проведено зі зразками природних вод із бюветів Деснянського району м. Києва, в яких концентрація загального Феруму перевищувала норми ГДК [3]. Після

застосування фератної обробки проби витримували протягом 30–60 хв, потім фільтрували і визначали залишковий вміст Феруму у воді. Ефективність фератної технології порівняно з адсорбційним методом очищення (табл. 3).

Таблиця 3

Вміст сполук Феруму в модельних розчинах і зразках бюветної води до та після очищення

Модельні розчини / вода з бюветів	Вміст сполук Феруму, мг/дм ³		
	до очищення	після очищення	
		фератною технологією	адсорбцією вугіллям
FeSO ₄	1.0	0.05	0.098
Fe(OH) ₂	1.0	0.04	0.082
FeS	1.0	0.07	0.135
вул. Бойченка, 15/17	0.73	0.047	0.094
вул. Волкова, 12а	0.87	0.036	0.073
вул. Бальзака, 63	0.35	0.035	0.070
вул. Закревського, 85	0.62	0.043	0.085
вул. Сабурова, 9/61	0.38	0.038	0.078
вул. Будищанська, 9/40	0.43	0.036	0.077
просп. Маяковського, 54/9	0.37	0.037	0.080

Встановлено, що після використання фератної технології очищення вміст йонів Феруму в усіх аналізованих зразках зменшився в 10–20 разів. Водночас знезалізнення води за фератною технологією відбулося вдвічі ефективніше проти адсорбційного очищення вугіллям.

Очевидно, що реальні зразки містять не тільки сполуки Fe(II), але й Fe(III), причому вміст останніх може бути навіть домінівним. Водночас із даних (див. табл. 3) видно, що фератна обробка і в цих дослідах є ефективною. Раніше встановлено, що позитивний вплив ферату в подібних випадках може бути пояснений, за аналогією з комплексами кобальту [27], руйнуванням комплексних сполук Феруму(III) і звільненням його у вигляді осаду [28]. Результати досліджень фератів лужних металів зі сполуками Fe(III) будуть викладені в наступній статті.

Висновки. Вивчено термодинамічні й кінетичні закономірності взаємодії різних за своєю природою сполук Феруму(II) з калій фератом. Показано, що хімічні реакції K₂FeO₄ з розчинами FeSO₄, FeCl₂, Fe(NO₃)₂, а також суспензіями Fe(OH)₂, FeCO₃ і FeS протікають без кінетичних ускладнень і з високим виходом (~ 100 %). Запропоновано використовувати ферати(VI) лужних металів замість традиційних окиснювачів у водоочищенні.

Вперше експериментально продемонстровано принципову можливість застосування нової технології очищення природних вод з метою видалення сполук Феруму(II) за допомогою фератів(VI).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Health Organization: Guidelines for drinking water quality. 4-th edition. Geneva, 2017.
2. Goncharuk V. V. Science about Water. K.: Akadempriodyka, 2014. 440 p.
3. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: Державні санітарні норми та правила ДСанПіН 2.2.4-171-10. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 25 с.
4. Гомеля М. Д., Трус І. М., Грабітченко В. М. Вплив аерації та електролізу на зниження вмісту заліза. *Екологічна безпека*. 2014. № 1 (17). С. 78-82.
5. Goncharuk V. V. Drinking Water: Physics, Chemistry and Biology. 2014. 426 p.
6. Физико-химические методы очистки воды. Управление водными ресурсами; под ред. И. М. Астрелина. Киев: Проект "Водная гармония", 2015. 614 с.
7. Terpong-Tsindé R., Crane R., Noubacter C., Nassi A., Ruppert H. Testing Metallic Iron Filtration Systems for Decentralized Water Treatment at Pilot Scale. *Water*. 2015. Vol. 7, N 3. P. 868-897. doi: <https://doi.org/10.3390/w7030868>.
8. Okoniewska E., Lach J., Kacprzak M., Neczaj E. The removal of manganese, iron and ammonium nitrogen on impregnated activated carbon. *Desalination*. 2007. Vol. 206, N 1-3. P. 251-258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.055>.
9. Гончарова І. В., Головка Д. А. Адсорбційне очищення бюветної води від йонів Феруму(III). *Міжнар. наук.-практ. журн. "Товари і ринки"*. 2018. № 2 (26). С. 34-45.
10. Baba A., Ibrahim L., Adekola F., Bale R., Ghosh M., Sheik A. et al. Hydro-metallurgical Processing of Manganese Ores: A Review. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2014. Vol. 2, N 3. P. 230-247. doi: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2014.23028>.
11. Rosliza R., Senin H. B., Subhi B. O., Wan Nik W. B., Azhar M. S. Adsorption of iron from aqueous solutions using sawdust. *AIP Conference Proceedings*. 2007. Vol. 909, N 1. P. 171. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2739847>.
12. Гомеля М. Д., Твердохліб М. М. Дослідження ефективності очищення води від сполук заліза за допомогою модифікованих фільтрувальних завантажень. *Сх.-Європейський журн. передових технологій*. 2016. Т. 2, № 10 (80). С. 47-52. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.63608>.
13. Твердохліб М. М., Гомеля М. Д. Дослідження ефективності знезалізнення води в присутності магнетиту та модифікованої магнетитом смоли. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. Київ: КНУБА, 2017. Вип. 28. С. 324-332.
14. Halysh V., Sevastyanova O., Riazanova A., Pasalskiy B., Budnyak T., Lindström M. et al. Walnut shells as a potential low-cost lignocellulosic sorbent for dyes and metal ions. *Cellulose*. 2018. Vol. 25. P. 4729-4742. doi: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1896-y>.
15. Guo Y., Huang T., Wen G., Cao X. Comparisons of the film peeling from the composite oxides of quartz sand filters using ozone, hydrogen peroxide and chlorine dioxide. *Journal of Environmental Sciences*. 2015. Vol. 1, N 34, P. 20-27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.03.004>.
16. Yavorskiy V. T., Kalymon Ya. A., Rubai O. I. Kinetics of ferrum(II) ions oxidation by air oxygen in water in horizontal absorber with bucket-like dispersers. *Chemistry and Chem. Technology*. 2015. Vol. 9, N 4. P. 503-507. doi: <https://doi.org/10.23939/chcht09.04.503>.

17. Яворський В. Т., Калимон Я. А., Рубай О. І. Дослідження впливу сполук Феруму(III) на процес окиснення йонів Феруму(II) киснем повітря. *Сх.-Європейський журн. передових технологій*. 2015. № 4/6 (76). С. 13-17. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47460>.
18. Калашников Е. Г., Арутюнова И. Ю., Смирнов А. Д. Исследование различных методов дезодорации воды при водоподготовке. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2007. № 1. С. 17-24.
19. Howe K., Hand D., Crittenden J., Trussell R., Tchobanoglous G. Principles of water treatment. California: John Wiley and Sons, 2012. 674 p.
20. Ghosh D., Solanki H., Purkait M. K., Hazard J. Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique. *Mater.* 2008. Vol. 155, N 1-2. P. 135-143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.042>.
21. Гасанов М. А., Гашимов А. М., Алиев В. А., Гурбанов К. Б. Адсорбционная очистка подземных вод от железа и марганца с использованием воздействий электрических разрядов. *Электронная обработка материалов*. 2005. № 3. С. 73-76.
22. Кореман Я. И. Практикум по аналитической химии. Воронеж: изд-во Воронеж. ун-та, 1989. 225 с.
23. Sharma V. K., Zboril R., Varma R. S. Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies. *Accounts of Chemical Research*. 2015. Vol. 48, N 2. P. 182-191. doi: <https://doi.org/10.1021/ar5004219>.
24. Carr J. D., Goncharova I. V., Golovko D. A., McLaughlin C. W., Golovko I. D., Erickson J. E. Study of the oxidation kinetics of nitrite ions by potassium ferrate(VI). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3, N 6(93). P. 18-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133460>.
25. Talaiekhozani A., Talaei M. R., Rezaia S. An overview on production and application of ferrate(VI) for chemical oxidation, coagulation and disinfection of water and wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017. Vol. 5, N 2. P. 1828-1842. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.03.025>.
26. Golovko D. A., Sharma V. K., Suprunovich V. I., Pavlova O. V., Golovko I. D., Bouzek K., Zboril R. A simple potentiometric titration method to determine concentration of ferrate(VI) in strong alkaline solutions. *Analytical Letters*. 2011. Vol. 44. N 7. P. 1333-1340. doi: <https://doi.org/10.1080/00032719.2010.511748>.
27. Golovko D. A., Goncharova I. V. Potassium ferrate(VI) – a new reagent for special water treatment. *VI Міжнародна науково-практична конференція "Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти" "Чиста вода 2019"*. Київ: КПІ, 2019. С. 38.
28. Golovko D. A., Goncharova I. V., Barashovets Ya. O. Innovative ferrate technologies for removal of iron from natural waters. *III Міжнародна науково-практична інтернет-конференція "Підприємництво, торгівля, маркетинг: стратегії, технології та інновації"*. Київ: Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2020. С. 182-183.

Стаття надійшла до редакції 31.05.2020.

Golovko D., Goncharova I., Barashovets Ya. The ferrate technology of natural waters treatment.

Background. Today it is important to use the resource of natural waters from artesian wells to provide the population with drinking water. The main methods of deironing water from natural sources were analyzed. Physical and chemical methods for removing of iron compounds from water have been considered. As an alternative to existing methods, water treatment by the ferrate technology is proposed, this relates to reagent methods of purification with universal action.

The aim of work is to prove the possibility of using ferrate technology to remove iron compounds from natural waters based on the study of thermodynamic and kinetic regularities of iron(II) reactions of different nature with potassium ferrate(VI), comparing it with adsorption purification by coal.

Materials and methods. The objects of the study are model solutions that contain soluble and insoluble simple salts, suspensions or colloidal forms of iron and samples of natural waters from pump-rooms of the Desnianskyi district of Kyiv, in which the concentration of iron exceeded the maximum permissible concentration.

The content of iron compounds before and after purification was determined by the spectrophotometric method (*Specord 210* of *Analytik Jena* company) at a wavelength of 510 nm.

The removal of iron ions from model solutions and samples of pump-rooms water was performed by the ferrate technology and adsorption purification with activated carbon of the brand *NORIT SA4 PAH* (Netherlands).

The phase composition of the obtained precipitates was investigated by X-ray diffractometer *DRON-2.0*.

Results. Thermodynamic and kinetic regularities of the iron(II) reactions of different nature with potassium ferrate(VI) have been studied. The content of iron compounds in model solutions and samples of pump-rooms water of the Desnianskyi district of Kyiv was determined. Purification of experimental samples from iron ions by ferrate technology in comparison with adsorption by coal has been carried out. The prospects of using a new ferrate technology for treatment of pump-rooms water from excess of iron ions are proved.

Conclusion. Thermodynamic and kinetic regularities of the interaction of iron(II) compounds of different nature with potassium ferrate have been studied. It was shown that chemical reactions of K_2FeO_4 with solutions of $FeSO_4$, $FeCl_2$, $Fe(NO_3)_2$, as well as suspensions of $Fe(OH)_2$, $FeCO_3$ and FeS proceed without kinetic complications and with high yield (~ 100 %). Instead of traditional oxidants in water treatment, it was proposed to use ferrates(VI) of alkaline metals.

For the first time, the fundamental possibility of using a new technology of natural waters purification to remove iron(II) compounds by ferrates(VI) was experimentally demonstrated.

Keywords: natural waters, quality, safety, iron compounds, potassium ferrate(VI), water deironing methods, ferrate technology.

REFERENCES

1. Guidelines for drinking water quality. *World Health Organization*. (2017). Geneva [in English].
2. Goncharuk, V. V. (2014). *Science about Water*. Kyiv: Akadempriodyka [in English].
3. Gigijenični vymogy do vody pytnoi', pryznachenoj dlja spozhyvannja ljudynoju [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption]. (2010). Derzhavni sanitarni normy ta pravyla *DSanPiN 2.2.4-171-10* – State sanitary norms and rules *DSanPiN 2.2.4-171-10*. Kyi'v: Derzhspozhyvstandart Ukrai'ny [in Ukrainian].
4. Gomelja, M. D., Trus, I. M., & Grabitchenko, V. M. (2014). Vplyv aeracii' ta elektrolizu na znyzhennja vmistu zaliza [The effect of aeration and electrolysis on the reduction of iron content]. *Ekologichna bezpeka – Ecological safety*, 1 (17), 78-82 [in Ukrainian].
5. Goncharuk, V. V. (2014). *Drinking Water: Physics, Chemistry and Biology* [in English].
6. *Fiziko-himicheskie metody ochistki vody. Upravlenie vodnymi resursami [Physico-chemical methods of water purification. Water resources management]*. (2015). I. M. Astrelin (Ed.). Kiev: Proekt "Vodnaja harmonija" [in Russian].
7. Tepong-Tsindé, R., Crane, R., Noubactep, C., Nassi, A., & Ruppert, H. (2015). Testing Metallic Iron Filtration Systems for Decentralized Water Treatment at Pilot Scale. *Water*. (Vol. 7), 3, 868-897. doi: 10.3390/w7030868 [in English].

8. Okoniewska, E., Lach, J., Kacprzak, M., & Neczaj, E. (2007). The removal of manganese, iron and ammonium nitrogen on impregnated activated carbon. *Desalination*. (Vol. 206), 1-3, 251-258. doi: 10.1016/j.desal.2006.04.055 [in English].
9. Goncharova, I. V., & Golovko, D. A. (2018). Adsorbciyjne ochyshhennja bjuvetnoi' vody vid joniv Ferumu(III) [Adsorption purification of pumping water from iron ions (III)]. *Mizhnar. nauk.-prakt. zhurn. "Tovary i rynky" – International scientific-practical magazine. "Commodities and markets"*, 2 (26), 34-45 [in Ukrainian].
10. Baba, A., Ibrahim, L., Adekola, F., Bale, R., Ghosh, M., Sheik, A. et al. (2014). Hydro-metallurgical Processing of Manganese Ores: A Review. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. (Vol. 2), 3, 230-247. doi: 10.4236/jmmce.2014.23028 [in English].
11. Rosliza, R., Senin, H. B., Subhi, B. O., Wan, Nik W. B., & Azhar, M. S. (2007). Adsorption of iron from aqueous solutions using sawdust. *AIP Conference Proceedings*. (Vol. 909), 1, 171. doi: 10.1063/1.2739847 [in English].
12. Gomelja, M. D., & Tverdohlib, M. M. (2016). Doslidzhennja efektyvnosti ochyshhennja vody vid spoluk zaliza za dopomogoju modyfikovanyh fil'truval'nyh zavan-tazhen' [Investigation of the efficiency of water purification from iron compounds using modified filter loads]. *Shidno-Jevropejs'kyj zhurnal peredovyh tehnologij – Eastern European Journal of Advanced Technologies*. (Vol. 2), 10 (80), 47-52. doi: 10.15587/1729-4061.2016.63608 [in Ukrainian].
13. Tverdohlib, M. M., & Gomelja, M. D. (2017). Doslidzhennja efektyvnosti znezalizi-znennja vody v prysutnosti magnetytu ta modyfikovanoi' magnetytom smoly [Study of the effectiveness of water deironing in the presence of magnetite and magnetite-modified resin]. *Problemy vodopostachannja, vodovidvedennja ta gidravliky – Problems of water supply, drainage and hydraulics*. Kyi'v: KNUBA. (Issue 28), (pp. 324-332) [in Ukrainian].
14. Halysh, V., Sevastyanova, O., Riazanova, A., Pasalskiy, B., Budnyak, T., Lindström, M. et al. (2018). Walnut shells as a potential low-cost lignocellulosic sorbent for dyes and metal ions. *Cellulose*. (Vol. 25), (pp. 4729-4742). doi: 10.1007/s10570-018-1896-y [in English].
15. Guo, Y., Huang, T., Wen, G., & Cao, X. (2015). Comparisons of the film peeling from the composite oxides of quartz sand filters using ozone, hydrogen peroxide and chlorine dioxide. *Journal of Environmental Sciences*. (Vol. 1), 34, 20-27. doi: 10.1016/j.jes.2015.03.004 [in English].
16. Yavorskiy, V. T., Kalymon, Ya. A., & Rubai, O. I. (2015). Kinetics of ferrum(II) ions oxidation by air oxygen in water in horizontal absorber with bucket-like dispersers. *Chemistry and Chem. Technology*. (Vol. 9), 4, 503-507. doi: 10.23939/chcht09.04.503 [in English].
17. Javors'kyj, V. T., Kalymon, Ja. A., & Rubaj, O. I. (2015). Doslidzhennja vplyvu spoluk Ferumu(III) na proces okysnennja joniv Ferumu(II) kysnem povitlja [Investigation of the influence of iron (III) compounds on the process of oxidation of iron (II) ions by oxygen]. *Shidno-Jevropejs'kyj zhurnal peredovyh tehnologij – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 4/6 (76), 13-17. doi: 10.15587/1729-4061.2015.47460 [in Ukrainian].
18. Kalashnikov, E. G., Arutjunova, I. Ju., & Smirnov, A. D. (2007). Issledovanie raz-lichnyh metodov dezodoracii vody pri vodopodgotovke [The study of various methods of deodorization of water during water treatment]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika – Water supply and sanitary equipment*, 1, 17-24 [in Russian].
19. Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R., & Tchobanoglous, G. (2012). *Principles of water treatment*. California: John Wiley and Sons [in English].
20. Ghosh, D., Solanki, H., Purkait, M. K., & Hazard, J. (2008). Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique. *Mater.* (Vol. 155), 1-2, 135-143. doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.042 [in English].

21. Gasanov, M. A., Gashimov, A. M., Aliev, V. A., & Gurbanov, K. B. (2005). Adsorbionnaja ochildka podzemnyh vod ot zheleza i marganca s ispol'zovaniem vozdeystvij jelektricheskikh razrjadov [Adsorption purification of groundwater from iron and manganese using the effects of electric discharges]. *Jelektronnaja obrabotka materialov – Electronic material processing*, 3, 73-76 [in Russian].
22. Koreman, Ja. I. (1989). *Praktikum po analiticheskoj himii [Workshop on Analytical Chemistry]*. Voronezh: izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta [in Russian].
23. Sharma, V. K., Zboril, R., & Varma, R. S. (2015). Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies. *Accounts of Chemical Research*. (Vol. 48), 2, 182-191. doi: doi.org/10.1021/ar5004219 [in English].
24. Carr, J. D., Goncharova, I. V., Golovko, D. A., McLaughlin, C. W., Golovko, I. D., & Erickson, J. E. (2018). Study of the oxidation kinetics of nitrite ions by potassium ferrate(VI). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. (Vol. 3), 6(93), 18-25. doi: 10.15587/1729-4061.2018.133460 [in English].
25. Talaiekhosani, A., Talaei, M. R., & Rezaia, S. (2017). An overview on production and application of ferrate(VI) for chemical oxidation, coagulation and disinfection of water and wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. (Vol. 5), 2, 1828-1842. doi: 10.1016/j.jece.2017.03.025 [in English].
26. Golovko, D. A., Sharma, V. K., Suprunovich, V. I., Pavlova, O. V., Golovko, I. D., Bouzek, K., Zboril, R. (2011). A simple potentiometric titration method to determine concentration of ferrate(VI) in strong alkaline solutions. *Analytical Letters*. (Vol. 44), 7, 1333-1340. doi: 10.1080/00032719.2010.511748 [in English].
27. Golovko, D. A., & Goncharova, I. V. (2019). Potassium ferrate(VI) – a new reagent for special water treatment. *Proceedings of the VI Mizhnarodna naukovopraktychna konferencija "Chysta voda. Fundamental'ni, prykladni ta promyslovi aspekty" "Chysta voda 2019" – Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference "Pure Water. Fundamental, applied and industrial aspects" "Pure Water 2019"*. Kyi'v: KPI [in English].
28. Golovko, D. A., Goncharova, I. V., & Barashovets, Ya. O. (2020). Innovative ferrate technologies for removal of iron from natural waters. *Proceedings of the III Mizhnarodna naukovopraktychna internet-konferencija "Pidpryjemnyctvo, tovgivlja, marketing: strategii', tehnologii' ta innovacii'" – Proceedings of the III International Scientific and Practical Internet Conference "Entrepreneurship, Trade, Marketing: Strategies, Technologies and Innovations"*. Kyi'v: Kyi'vs'kyj nacional'nyj tovgovel'no-ekonomichnyj universytet [in English].