

Досліджено фізико-хімічні особливості процесів синтезу композиційних матеріалів на основі нанорозмірного Fe^0 і глинистих мінералів та вивчено їх сорбційну здатність по відношенню до сполук кобальту. Проведено дослідження реологічних властивостей дисперсій палигорськіту, модифікованих нанодисперсним залізом. Показано можливість їх використання при очищенні підземних вод із застосуванням сучасних природоохоронних технологій

Ключові слова: композиційні матеріали, нанорозмірне Fe^0 , сорбційна здатність, сполуки кобальту, реологічні властивості

Исследованы физико-химические особенности процессов синтеза композиционных материалов на основе наноразмерного Fe^0 и глинистых минералов, а также изучена их сорбционная способность по отношению к соединениям кобальта. Проведены исследования реологических свойств дисперсий палигорскита, модифицированного нанодисперсным железом. Показана возможность их использования при очистке подземных вод с применением современных природоохраных технологий

Ключевые слова: композиционные материалы, наноразмерное Fe^0 , сорбционная способность, соединения кобальта, реологические свойства

УДК 544.723.212+546.72+661.183.55

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.46580

СИНТЕЗ ТА СОРБЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НАНОРОЗМІРНОГО Fe^0

В. Ю. Тобілко
Асистент*

E-mail: v_tobilko@mail.ru

Б. Ю. Корнілович

Член-кореспондент НАН України, доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри*

E-mail: b_kornilovych@kpi.ua

*Кафедра хімічної технології кераміки та скла
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Однією із важливих проблем в охороні навколишнього середовища є необхідність розробки ефективних та економічно доцільних технологій очищення вод від небезпечних неорганічних токсикантів – важких металів. Для вирішення цієї задачі перспективними є сорбційні методи. Вони дозволяють ефективно видаляти з водного середовища іони металів, які містяться в дуже малих кількостях у порівнянні з високими концентраціями інших солей. При цьому, незважаючи на високу сорбційну здатність відомих на сьогодні синтетичних сорбентів, значним недоліком є їх порівняно висока вартість. Саме тому важливим для розробки природоохоронних технологій є одержання дешевих сорбентів, наприклад, композиційних силікатних матеріалів на основі природних глинистих мінералів. З метою підвищення їх сорбційної здатності перспективним є модифікування поверхні алюмосилікатів сполуками заліза, зокрема, (окси)гідроксидами різного хімічного складу, нанорозмірним Fe^0 та ін.

Останнім часом значну увагу дослідників привертають саме нанорозмірні матеріали, що характеризуються рядом унікальних фізичних і фізико-хімічних властивостей [1, 2]. Так, нанорозмірне Fe^0 має суттєво вищу адсорбційну здатність, порівняно з оксидами і гідроксидами заліза, котрі широко використовуються в практиці для видалення із водних середовищ небезпечних токсикантів як органічної так і неорганічної природи [3]. Це обумовлено не лише високими сорб-

ційними характеристиками нанодисперсного Fe^0 , а і його електроно-донорними властивостями [4].

У зв'язку з цим актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки сучасних вискоефективних сорбуючих матеріалів та технологічних рішень щодо їх застосування для вилучення важких металів із водних систем.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Стабільні наночастинки Fe^0 (<100 нм) мають типову, так звану, «core-shell» структуру, в якій центральна частина складається з нуля валентного заліза, а поверхня вкрита тонким шаром оксидів $Fe(II)$ і $Fe(III)$, що утворюються внаслідок протікання процесів окислення [5]. Стандартний редокс потенціал Fe^0 складає $Fe^0 = -0,44V$ і, тому, металічне залізо може виступати ефективним донором електронів:



Це робить можливим протікання різноманітних відновлювальних реакцій, що дозволяє знешкоджувати токсиканти шляхом їх розкладання (у випадку органічних речовин), або переведення в нерозчинні чи менш шкідливі форми (у випадку неорганічних речовин) [6].

Для одержання нанорозмірного Fe^0 наразі використовують два основних підходи. Перший базується на реакціях відновлення іонів Fe^{2+} або Fe^{3+} борогідридами лужних металів із водних розчинів їх солей в

кислоту середовищі. В основу другого підходу покладені гетерогенні реакції без участі води, такі як відновлення частинок гетиту чи гематиту воднем при підвищених температурах (200–600 °С) або розкладання солей заліза ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) в органічних розчинниках чи в середовищі аргону [7, 8].

Значна величина питомої поверхні нанодисперсного заліза обумовлює малу стійкість до окислення за звичайних умов, а також велику схильність до агрегації одержаних порошоків. Це ускладнює їх зберігання і подальше застосування в природоохоронних технологіях. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати при синтезі в якості додаткових реагентів поверхнево-активні або хелатоутворюючі агенти [9, 10].

Одним з найбільш перспективних підходів до стабілізації наночасточок є їх нанесення на тверду поверхню, що суттєво підвищує стійкість таких систем [4]. В якості темплат при синтезі можуть бути використані різноманітні поруваті матеріали, серед яких суттєві переваги мають природні дисперсні мінерали з групи шаруватих та шарувато-стрічкових силікатів, що поєднують високу питому поверхню і реакційну здатність зразків з їх низькою вартістю [11, 12]. Застосування таких композиційних матеріалів доцільно, як в стаціонарних сорбційних процесах, так і в новітніх природоохоронних *in situ* технологіях очищення підземних вод і ґрунтів, що базуються на безпосередньому закачуванні активної речовини у вигляді водних чи водно-органічних дисперсій в забруднені шари ґрунту через нагнітальні свердловини [13].

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження фізико-хімічних особливостей процесів синтезу композиційних матеріалів на основі нанорозмірного Fe^0 та глинистих мінералів (монтморилоніту і палигорськиту), а також вивчення їх сорбційних властивостей по відношенню до таких небезпечних токсикантів, як сполуки кобальту.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- дослідити фізико-хімічні особливості процесів синтезу композиційних матеріалів на основі нанорозмірного Fe^0 і природних глинистих мінералів (монтморилоніту та палигорськиту);
- вивчити сорбційну взаємодію в системах $\text{Co}(\text{II})$ – природні глинисті мінерали з нанесеним шаром нанорозмірного Fe^0 ;
- дослідити реологічні властивості суспензії нанодисперсного реакційноактивного матеріалу на основі глинистого мінералу палигорськиту та показати можливість використання його для очищення підземних вод від забруднення іонами важких металів.

4. Матеріали та методи дослідження композиційних силікатних сорбентів

4. 1. Синтез сорбційних матеріалів

Дослідження проводили з використанням шаруватого силікату з набухаючою структурою (структурний пакет 2:1) – монтморилоніту (ММТ) та шарувато-стрічкового силікату палигорськиту (ПГ) (обидва мінерали Черкаського родовища, Україна). Очищення

індивідуальних мінералів від домішок кварцу, польових шпатів, карбонатів, оксидів алюмінію та заліза проводили згідно загальноприйнятих методик [14]. Глинисті мінерали в Na – формі отримували шляхом триразової обробки 1 М розчином NaCl очищених природних зразків у співвідношенні твердої та рідкої фаз Т:Р=1:20. Витримка суспензії при кожній обробці складала декілька діб. Після цього проводили багаторазове відмивання зразків (Na – ММТ та Na – ПГ) дистильованою водою до негативної реакції на Cl^- у промивній воді (контролювали якісно по AgNO_3).

Синтез нанорозмірного заліза Fe^0 проводили в атмосфері азоту за модифікованою методикою [8], використовуючи установку, схематичне зображення якої представлено на рис. 1. В тригорлу колбу вносили розчин $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ об'ємом 100 cm^3 певної концентрації та при перемішуванні повільно з допомогою перистальтичного насоса подавали відновник NaBH_4 об'ємом 100 cm^3 впродовж 1 год. Мольне співвідношення $\text{Fe}^{3+}:\text{BH}_4^-$ складало 1:5,5. Після того, як весь об'єм відновника було використано, суміш перемішували ще 1 год. Отримане нанорозмірне залізо відділяли від рідкої фази центрифугуванням, промивали тричі спиртом та висушували під вакуумом при температурі 60 °С.

Для одержання композиційних сорбентів « Fe^0 – глинистий мінерал» з масовим співвідношенням Fe^0 : глинистий мінерал (0,1:1) використовували модифіковану методику [15]. Наважку Na-форми монтморилоніту (палигорськиту) заливали розчином $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (об'єм 100 cm^3) певної концентрації та перемішували протягом 30 хвилин на магнітній мішалці. Отриману суспензію (рН=2) кількісно переносили в тригорлу колбу та проводили процес відновлення іонів Fe^{3+} розчином борогідриду натрію в атмосфері азоту (рис. 1). Після чого отриманий композиційний сорбент відділяли від рідкої фази центрифугуванням та тричі промивали спиртом. Отриманий осад висушували під вакуумом при температурі 60 °С та подрібнювали до отримання фракції $\leq 0,1$ мм. Масове співвідношення між складовими композиційного сорбенту становило 0,1 г Fe^0 на 1 г глинистого мінералу (Fe^0 – ММТ (0,1:1)).

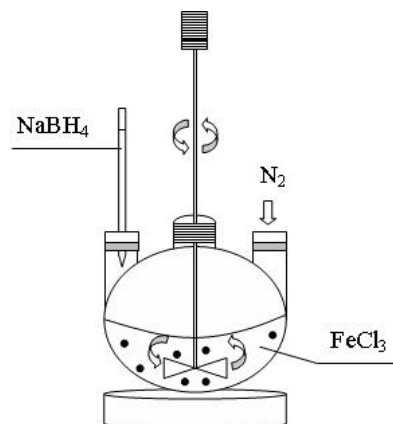


Рис. 1. Лабораторна установка для синтезу композиційних сорбентів

4. 2. Фізико-хімічні методи дослідження композиційних силікатних сорбентів

Мономінеральність отриманих зразків природних глинистих мінералів та фазовий склад композицій-

них матеріалів контролювались рентгенографічно на дифрактометрі ДРОН-4-07 з двома щілинами Соллера з використанням відфільтрованого $\text{CuK } \alpha$ -випромінювання в діапазоні 2–40° (2 θ).

Очищення вод від забруднення важкими металами (Co^{2+}) з використанням природних глинистих мінералів та композиційних сорбентів вивчали на модельних розчинах, які готували на дистильованій воді з використанням солі $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та 1 М розчину NaCl для створення іонної сили ($I=0,01$). Величину рН модельних розчинів корегували 0,1 М розчинами NaOH та HCl і контролювали на іонмірі $I - 160 \text{ M}$.

Сорбцію важких металів глинистими мінералами та композиційними силікатними сорбентами проводили в статичних умовах при кімнатній температурі та заданій іонній силі при безперервному струшуванні зразків протягом 1 год (об'єм водної фази – 50 cm^3 , наважка сорбенту – 0,1 г). Після встановлення адсорбційної рівноваги водну фазу відділяли центрифугуванням та визначали в ній рівноважну концентрацію металу спектрофотометричним методом на приладі UNICO 2100UV з використанням реагенту нітритно- R -солі.

Величину сорбції металів (а) розраховували за формулою:

$$a = (C_0 - C_p) \cdot V / m, \text{ мкмоль/г} \quad (2)$$

де C_0 та C_p – вихідна та рівноважна концентрація металу, мкмоль/дм^3 ; V – об'єм розчину, дм^3 ; m – маса наважки сорбенту, г.

Для визначення концентрації кобальту(II) використовували методику, описану в роботі [16].

Реологічні властивості дисперсій палигорськіту вивчали з допомогою ротаційного віскозиметра «Rheotest-2» (Німеччина) з термостатуванням зразків при 25 °С.

Вихідну суспензію з масовою концентрацією палигорськіту 20 % попередньо обробляли з допомогою диспергатора УЗДН-2Т ультразвуком частотою 22 кГц та інтенсивністю випромінювання 12 Вт/см². Тривалість обробки складала 10 хвилин. В процесі обробки зразок охолоджували. Після цього до підготовленої суспензії палигорськіту вносили розчин хлориду заліза ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) визначеної концентрації. Кількість іонів Fe^{3+} , необхідного для модифікування, визначали відносно катіонообмінної ємності (КОЄ) мінералу, яка складає 0,25 ммоль/г для палигорськіту Черкаського родовища [14]. Було приготовлено три зразки: вихідний палигорськіт – зразок ПГ, модифікований при співвідношенні $\text{КОЄ}/\text{Fe}^{3+} 1:1$ – зразок ПГ(1): $\text{Fe}^0(1)$ та при співвідношенні $\text{КОЄ}/\text{Fe}^{3+} 1:5$ – зразок ПГ(1): $\text{Fe}^0(5)$. Після внесення визначеної кількості $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ суспензію перемішували певний час на магнітній мішалці, а потім проводили процес відновлення іонів Fe^{3+} борогідридом натрію а атмосфері азоту аналогічно методу, описаному вище. Після додавання розчину заліза та відновника суспензія мала масову концентрацію палигорськіту 8 %.

5. Результати досліджень фізико-хімічних особливостей процесів синтезу та сорбційних властивостей композиційних матеріалів

Для контролю мономінеральності зразків природних глинистих мінералів та визначення фазового скла-

ду одержаних сорбуючих матеріалів було проведено дослідження з використанням рентгенографічний методу.

На рис. 2 представлені дифрактограми неорієнтованих зразків композиційних сорбентів на основі монтморилоніту з нанесеним на поверхню шаром нанорозмірного заліза Fe^0 . Для порівняння також наведена дифрактограма вихідного монтморилоніту.

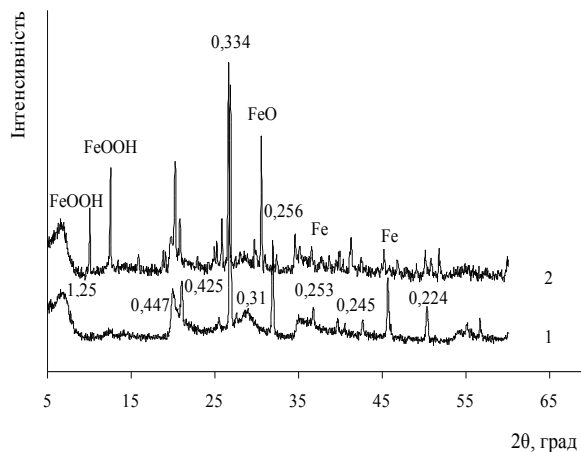


Рис. 2. Дифрактограми природного та модифікованого монтморилоніту: 1 – Na – ММТ; 2 – Fe^0 – ММТ (0,1:1)

На рентгенограмі, яка відповідає вихідному глинистому мінералу (рис. 2, крива 1), спостерігається серія базальних рефлексів 1,252; 0,315; 0,253 нм та лінії двоімірної дифракції – 0,447; 0,256; 0,224 нм. Найявніші на порошкових рентгенограмах вказаних дифракційних відбитків є характерним для смектитів, а вузькі та інтенсивні лінії з міжплощинною відстанню 0,425; 0,334; 0,245 нм відносяться до кварцу.

Після нанесення шару нанорозмірного заліза на поверхню монтморилоніту у масовому співвідношенні 0,1 г Fe^0 на 1 г глинистого мінералу (рис. 2, крива 2) на дифрактограмах з'являються рефлекси при 2θ від 44,9° і 35,8°, які вказують на наявність в складі композиційного сорбенту кристалічних фаз нульвалентного заліза (α - Fe), оксиду заліза (FeO), а також гетиту (FeOOH) при менших значеннях 2θ [17].

На рис. 3 представлені дифрактограми неорієнтованих зразків композиційних сорбентів на основі палигорськіту з нанесеним на поверхню шаром нанорозмірного заліза Fe^0 . Для порівняння також наведена дифрактограма вихідного палигорськіту.

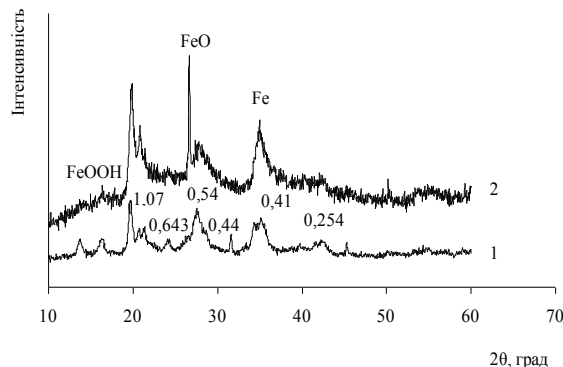


Рис. 3 Дифрактограми природного та модифікованого палигорськіту: 1 – Na – ММТ; 2 – Fe^0 – ПГ (0,1:1)

На рентгенограмі, яка відповідає вихідному глинистому мінералу (рис. 3, крива 1) спостерігається серія базальних рефлексів 1,07; 0,64; 0,417 нм та лінії дво-мірної дифракції – 0,542; 0,449; 0,254 нм. Наявність на порошкових рентгенограмах вказаних дифракційних відбитків є характерним для палигорськітів.

Після нанесення шару нанорозмірного заліза на поверхню шарувато-стрічкового силікату (рис. 3, крива 2) на дифрактограмах з'являються рефлекси, які вказують на наявність в складі композиційного сорбенту кристалічних фаз нульвалентного заліза (α -Fe), оксиду заліза (FeO), а також гетиту (FeOOH) [17].

Ефективність очищення вод від забруднення катіонами металів з використанням монтморилоніту, модифікованого нанорозмірним залізом, була вивчена нами на прикладі іонів Co^{2+} .

Для визначення оптимальних умов проведення сорбційних експериментів була вивчена кінетика процесів сорбції $Co(II)$ природним монтморилонітом та нанорозмірним залізом ($I=0,01$, $C_{Co^{2+}}=850$ мкмоль/дм³, $pH=6,0$). Отримані залежності представлено на рис. 4.

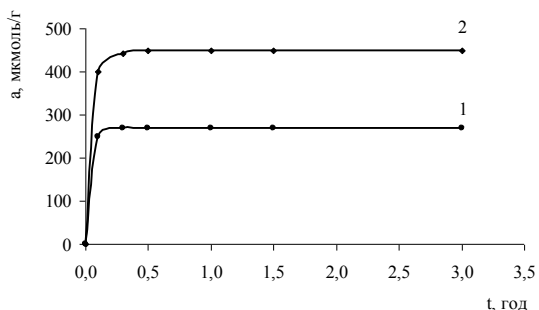


Рис. 4. Кінетика сорбції Co^{2+} : 1 – Na – ММТ; 2 – нанорозмірне Fe^0

Вплив pH на величину сорбції кобальту монтморилонітом, модифікованим нанодисперсним залізом у масовому співвідношенні 0,1 г Fe^0 на 1 г шаруватого силікату (Fe^0 – ММТ (0,1:1)), представлено на рис. 5. Для порівняння показано також залежності сорбції іонів Co^{2+} монтморилонітом та нанорозмірним залізом Fe^0 від pH водного середовища ($I=0,01$, $C_{Co^{2+}}=850$ мкмоль/дм³).

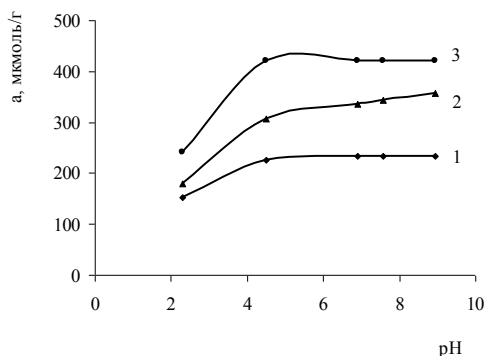


Рис. 5. Вплив pH на сорбцію Co^{2+} сорбентами: 1 – Na – ММТ, 2 – нанорозмірне Fe^0 , 3 – Fe^0 – ММТ (0,1:1)

На рис. 6 представлені ізотерми сорбції іонів Co^{2+} композиційними матеріалами. Для порівняно показано також залежності величин адсорбції іонів Co^{2+}

(а, мкмоль/г) монтморилонітом та нанорозмірним залізом Fe^0 від рівноважної концентрації металу в розчині (C_p , мкмоль/дм³).

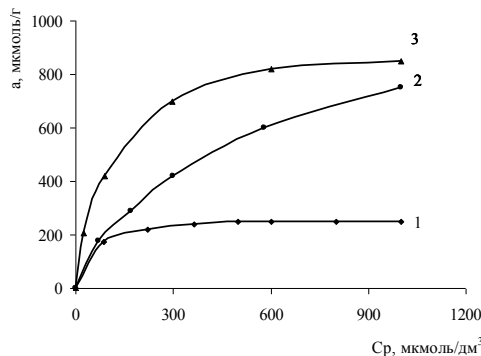


Рис. 6. Ізотерми сорбції Co^{2+} сорбентами при $pH=7,0$: 1 – Na – ММТ, 2 – нанорозмірне Fe^0 , 3 – Fe^0 – ММТ (0,1:1)

Для обґрунтування можливості використання реакційно активного матеріалу на основі глинистого мінералу палигорськіту для очищення підземних вод від забруднення ураном, були виконані реологічні дослідження з метою вивчення впливу нанодисперсного заліза на структурно-реологічні характеристики дисперсій.

Особливості реологічної поведінки дисперсій глинистих мінералів, що модифіковані наночастинками заліза, досліджено на прикладі модифікованих дисперсій палигорськіту – мінералу, високі тиксотропні властивості якого обумовлюють його можливе використання в природоохоронних технологіях. На рис. 7 представлено реологічні криві течії дисперсій природного мінералу.

Для аналізу одержаних результатів була використана реологічна модель Шведова – Бінгама, яка характеризується двома параметрами: τ_0 – граничним напруженням зсуву і в'язкістю – η .

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot D, \tag{3}$$

де τ – напруження зсуву, Па; D – швидкість зсуву, с⁻¹.

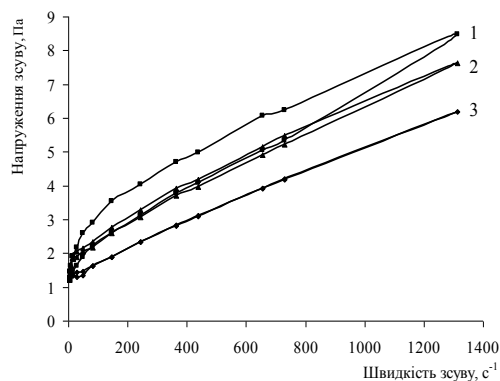


Рис. 7. Реологічні криві течії дисперсій палигорськіту: 1 – палигорськіт (ПГ); 2 – ПГ(1): Fe^0 (1); 3 – ПГ(1): Fe^0 (5)

Параметри рівняння Шведова-Бінгама, отримані на основі реологічних кривих течії досліджених суспензій, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Реологічні параметри суспензій палигорськіту

Зразок	Граничне напруження зсуву τ_0 , Па	Пластична в'язкість η Па.с
ПГ	3,4	0,0039
ПГ(1):Fe ⁰ (1)	2,6	0,0039
ПГ(1):Fe ⁰ (5)	1,6	0,0035

Аналіз одержаних даних показує, що зі збільшенням вмісту заліза в зразках граничне напруження зсуву зменшується, а пластична в'язкість практично не змінюється.

6. Обговорення результатів дослідження фізико-хімічних характеристик композиційних матеріалів

Першочергове значення при вивченні оптимальних умов проведення адсорбційних експериментів має час встановлення сорбційної рівноваги. Отримані дані (рис. 4) вказують на достатньо високу швидкість протікання сорбційних процесів в системі «композиційний матеріал – Co²⁺». Так, вже за 10–15 хвилин видаляється більше 90 % іонів Co²⁺, а 1 години цілком достатньо для досягнення сорбційної рівноваги. Ця тривалість сорбційних експериментів і була використана в подальших дослідженнях.

На ефективність вилучення кобальту сорбційними матеріалами суттєвий вплив має рН водного середовища. З представлених на рис. 5 даних можна побачити, що адсорбція кобальту як монтморилонітом, так і композиційним зразком, зростає при підвищенні рН до 4,5 та практично не змінюється в нейтральному та слабо лужному середовищі. Такий характер відповідних залежностей визначається природою функціональних груп на поверхні сорбентів, що обумовлюють сорбцію катіонів. Як відомо [14, 18], іонообмінна ємність глинистих мінералів обумовлена активними центрами як на базальних поверхнях частинок (за рахунок нестехіометричних ізоморфних заміщень в структурних пакетах), так і на бічних гранях (внаслідок утворення Si–ОН та Al–ОН груп по розірваних хімічних зв'язках). Природа зв'язування катіонів за тими двома типами активних центрів є різною: електростатична для іонів, що локалізуються біля базальних поверхонь, і іонно-ковалентна – для таких біля бічних граней. Останнє обумовлює характер залежності величин сорбції від рН: дисоціація поверхневих функціональних груп на поверхні сорбентів, головним чином, ОН – груп є незначною у кислому середовищі та досягає свого максимуму в нейтральному діапазоні рН.

Було визначено сорбційну здатність синтезованих матеріалів. З рис. 6 видно, що при модифікуванні поверхні монтморилоніту частинками нанорозмірного заліза сорбційна здатність одержаних зразків щодо іонів Co²⁺ суттєво підвищується. Це обумовлено збільшенням кількості активних центрів зв'язування катіонів в композиційному сорбенті, перш за все, за рахунок гідроксильних ОН⁻ груп в тонких оксидно-гідроксидних плівках на поверхні наночастинок Fe⁰.

Як видно з результатів дослідження реологічних властивостей дисперсій палигорськіту (рис. 7), криві течії суспензій мають типовий для псевдопластичних матеріалів вигляд, проте наявність нанодисперсного заліза впливає на їх реологічну поведінку. Зменшення площі петлі гістерезису кривих течії обумовлено зниженням енергії руйнування тиксотропної структури суспензії, що свідчить про її меншу міцність.

Зменшення граничного напруження зсуву (табл. 1) обумовлено тим, що в місцях контакту колоїдних частинок палигорськіту в тонких залишкових прошарках дисперсійного середовища знаходяться нанодисперсні частинки заліза. Це призводить до зменшення вандервальсових сил, завдяки яким утворюється коагуляційна структура суспензії палигорськіту, і, як наслідок, до зниження міцності структури та початку її руйнування під дією менших напружень зсуву. Можливо, що з тієї ж причини зменшується також число результативних, з точки зору утворення коагуляційної структури, контактів між частинками палигорськіту.

Пластична в'язкість не змінюється при вмісті нанодисперсного заліза в дослідженому інтервалі, тому що вона, головним чином, обумовлена зорієнтованими за потоком видовженими колоїдними частинками палигорськіту зруйнованої частини структури суспензії, при цьому частинки заліза через їх надто малу об'ємну частку практично не впливають на течію дисперсійного середовища.

7. Висновки

Проведеними дослідженнями фізико-хімічних особливостей процесів синтезу композиційних матеріалів на основі природних глинистих мінералів та нанодисперсного Fe⁰ встановлено, що при модифікації алюмосилікатів залізом на їх поверхні утворюються кристалічні фази (α – Fe, FeO та FeOOH), які проявляють високу спорідненість до катіонів металів.

Вивчено сорбційну взаємодію в системах Co(II) – природні глинисті мінерали з нанесенням шаром нанорозмірного Fe⁰ та встановлено, що обробка глинистих мінералів нанорозмірним залізом покращує сорбційні властивості природних силікатів. Композиційні матеріали на основі глинистих мінералів проявляють високу сорбційну здатність щодо іонів металів (Co²⁺) у порівнянні з вихідними зразками, що обумовлено збільшенням кількості активних центрів зв'язування катіонів в композиційному сорбенті, перш за все, за рахунок гідроксильних ОН⁻ груп в тонких оксидно-гідроксидних плівках на поверхні наночастинок Fe⁰.

Досліджено вплив нанодисперсного заліза на структурно-реологічні характеристики дисперсій палигорськіту, модифікованого нанорозмірним Fe⁰. Встановлено, що при вмісті заліза, рівному 1,4·10⁻² %, що відповідає співвідношенню катіонообмінної ємності мінералу до Fe³⁺ 1:5, суспензія залишається псевдопластичною, тобто стійкою та придатною для надійного закачування. Показано доцільність використання реакційноздатного високодисперсного матеріалу при очищенні підземних вод від іонів важких металів із застосуванням новітніх природоохоронних технологій, оснований на закачуванні водних дисперсій наноматеріалу у забруднені шари ґрунту.

Література

1. Неорганическое материаловедение: энциклопед. изд. в 2 т. Т. 1. Основы науки о материалах [Текст] / под ред. Г. Г. Гнесин, В. В. Скороход. – К.: Наук. думка, 2008. – 1152 с.
2. Шабанова, Н. А. Химия и технология нанодисперсных оксидов [Текст] / Н. А. Шабанова, В. В. Попов, П. Д. Саркисов. – М.: Академкнига, 2007. – 309 с.
3. Scott, T. B. Nano-scale metallic iron for the treatment of solutions containing multiple inorganic contaminants [Text] / T. B. Scott, I. C. Poercu, R. A. Crane, C. Noubacter // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – Vol. 186, Issue 1. – P. 280–287. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.10.113
4. Fu, F. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: A review [Text] / F. Fu, D. D. Dionysiou, H. Liu // Journal of Hazardous Materials. – 2014. – Vol. 267. – P. 194–205. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.062
5. Weile, Y. Nanoscale zero-valent iron (nZVI): Aspects of the core-shell structure and reactions with inorganic species in water [Text] / Y. Weile., A. Herzing, C. J. Kiely, W. Zhang // Journal of Contaminant Hydrology. – 2010. – Vol. 118, Issue 3–4. – P. 96–104. doi: 10.1016/j.jconhyd.2010.09.003
6. Cundy, A. B. Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: A review [Text] / A. B. Cundy, L. Hopkinson, R. L. D. Whitby // Science of The Total Environment. – 2008. – Vol. 400, Issue 1-3. – P. 42–51. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.002
7. Zhang, W. Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview [Text] / W. Zhang // J. Nanoparticle Res. – 2003. – Vol. 5. – P. 323–332.
8. Li, X. Zero-valent iron nanoparticles for abatement of environmental pollutants: materials and engineering aspects [Text] / X. Li, D. W. Elliott, W. Zhang // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2006. – Vol. 31. – P. 111–122. doi: 10.1080/10408430601057611
9. Sun, Y.-P. A method for the preparation of stable dispersion of zero-valent iron nanoparticles [Text] / Y.-P. Sun, X.-Q. Li, W.-X. Zhang, H. P. Wang // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2007. – Vol. 308, Issue 1–3. – P. 60–66. doi: 10.1016/j.colsurfa.2007.05.029
10. Allabaksh, M. B. Preparation of stable zero valent nanoparticles using different chelating agents [Text] / M. B. Allabaksh, B. K. Mandal, M. K. Kesarla, K. S. Kumar // J. Chem. Pharm. Res. – 2010. – Vol. 5. – P. 67–74.
11. Cheng, G. U. Synthesis of highly reactive subnano-sized zero-valent iron using smectite clay templates [Text] / G. U. Cheng, J. I. A. Hanzhong, H. Li et. al // Environmental Science & Technology. – 2010. – Vol. 44, Issue 11. – P. 4258–4263. doi: 10.1021/es903801r
12. Shi, L.-N. Removal of Chromium (VI) from wastewater using bentonite- supported nanoscale zero-valent iron [Text] / L.-N. Shi, X. Zhang, Z.-L. Chen // Water Research. – 2011. – Vol. 45, Issue 2. – P. 886–892. doi: 10.1016/j.watres.2010.09.025
13. Interstate Technology & Regulatory Council. Permeable Reactive Barriers: Technology Update. PRB-5 [Text]. – Washington, D.C., 2011. – 179 p.
14. Корнілович, Б. Ю. Природоохоронні технології в урановидобувній та переробній промисловості [Текст] / Б. Ю. Корнілович, О. Г. Сорокін, В. М. Павленко, Ю. Й. Кошик. – К., 2011. – 156 с.
15. Shi, L.-N. Synthesis, characterization and kinetics of bentonite supported nZVI for the removal of Cr(VI) from aqueous solution [Text] / L.-N. Shi, Y.-M. Lin, X. Zhang, Z. Chen // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Vol. 171, Issue 2. – P. 612–617. doi: 10.1016/j.cej.2011.04.038
16. Марченко, З. Фотометрическое определение элементов [Текст] / З. Марченко. – М.: Мир, 1971. – 547 с.
17. Brindley, G. Crystal structures of clay minerals and their X - ray indentification [Text] / G. Brindley, G. Brown. – London: Miner. Soc., 1980. – 496 p.
18. Корнілович, Б. Ю. Фізична хімія кремнезему і нанодисперсних силікатів [Текст] / Б. Ю. Корнілович, О. Р. Андрієвська, М. М. Племянников, Л. М. Спасьонова. – К.: Освіта України, 2013. – 176 с.