

АНАЛІЗ ІЗОТЕРМ АДСОРБЦІЇ ІОНІВ ЦИНКУ НА БЕНТОНІТІ ПІСЛЯ ОБРОБКИ ЙОГО НАДВИСОКОЧАСТОТНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Л. В. Сиса, Ю. І. Рудик, А. З. Концур

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007, Україна. E-mail: teacher_leon@ukr.net

На прикладі процесу сорбції іонів Цинку з водних розчинів показано, що зразок природного глинистого сорбенту бентоніту, попередньо зволожений та опромінений мікрохвилями, виявляє у 1,5 рази кращі сорбційні властивості, ніж необроблений (нативний) зразок. За відповідними рівняннями моделей Фрейндліха та Ленгмюра розраховано сорбційні параметри обох зразків. Гранична ємність за Цинком опроміненого мікрохвилями сорбенту становить 1,78 мг/г, тоді як для нативного бентоніту значення аналогічного параметру складає 1,23 мг/г. Висунуто припущення, що спільна дія двох факторів – опромінення мікрохвилями та гідротермальна деструкція поверхні кристалів - впливає на структуру глинистого матеріалу, розподіл макро- та мікропор, активізацію поглинаючої поверхні, а це, у свою чергу, призводить до зміни сорбційних параметрів. Розрахунок орієнтовних енерговитрат показав, що енергоспоживання в описаному авторами методі обробки сорбенту з використанням мікрохвиль на порядок менше від енергоспоживання у типовому методі підготовки сорбентів прожарюванням. Запропоновано використовувати мікрохвильовий спосіб підготовки сорбенту у процесі очистки стічних вод невеликих об'єктів.

Ключові слова: очистка води, бентоніт, цинк, мікрохвилі.

АНАЛИЗ ИЗОТЕРМ АДСОРБЦИИ ИОНОВ ЦИНКА НА БЕНТОНИТЕ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЕГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Л. В. Сыса, Ю. И. Рудык, А. З. Концур

Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности
ул. Клепаровская, 35, г. Львов, 79007, Украина. E-mail: teacher_leon@ukr.net

На примере процесса сорбции ионов цинка из водных растворов показано, что образец природного глинистого сорбента бентонита, предварительно увлажнённого и облучённого микроволнами, обладает в 1,5 раза лучшими сорбционными свойствами, чем необработанный (нативный) образец. Используя соответствующие уравнения моделей Фрейндлиха и Ленгмюра, рассчитаны сорбционные параметры обоих образцов. Граничная ёмкость по цинку облучённого микроволнами сорбента составляет 1,78 мг/г, в то время как для исходного бентонита значение аналогичного параметра составляет 1,23 мг/г. Выдвинуто предположение, что совместное воздействие двух факторов – облучение микроволнами и гидротермальна деструкция поверхности кристаллов - влияет на структуру глинистого материала, распределение макро- та мікропор, активізацію поглинаючої поверхності, а это, в свою очередь, приводит к изменению сорбционных параметров. Расчет ориентировочных энергозатрат показал, что энергопотребление в описанном авторами методе обработки сорбента с использованием микроволн на порядок меньше энергопотребления в типичном методе подготовки сорбентов прокаливанием. Предложено использовать микроволновой способ подготовки сорбента в процессе очистки сточных вод небольших объектов.

Ключевые слова: очистка воды, бентонит, цинк, микроволны.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Питання очистки стічних вод підприємств та житлово-комунальних стоків з кожним роком стає все актуальнішим. Серед багатьох забруднювачів води, які попадають у неї внаслідок виробничої діяльності людини, окремо слід виділити важкі метали – Pb, Cu, Zn, Cd, Hg та інші. У результаті нагромадження в зовнішньому середовищі ці метали становлять серйозну небезпеку з огляду на їх високу біологічну активність і токсичні властивості [1].

З перелічених вище металів Цинк відноситься до числа активних мікроелементів, що впливають на ріст і нормальний розвиток організмів. У той же час багато сполук Цинку токсичні, насамперед його сульфат і хлорид. Підвищений вміст цього металу може спричинити злочи́сні утворення. Отруєння Цинком супроводжується порушенням функцій шлунково-кишкового тракту. ГДК Zn^{2+} у питних водах становить 1 мг/дм³ [2].

Для очистки природних та стічних вод від

важких металів застосовують різноманітні механічні, фізико-хімічні та біологічні методи, але у першу чергу - сорбцію синтетичними та природними матеріалами. Після завершення сорбції більшість сорбентів утилізують, і лише найбільш цінні піддають регенерації. Використання в якості сорбентів простих та поширених глинистих гірських порід (у т.ч. бентоніту) значно здешевлює процес [3, 4].

Перспективним напрямком підвищення ефективності попередньої підготовки та регенерації сорбентів є використання для цієї мети надвисокочастотного електромагнітного випромінювання (НВЧ ЕМВ). Наразі такі дослідження проведено на прикладах окремих синтетичних сорбентів: активованого вугілля, іонообмінних смол, силікагелю і т.п. [5]. У той же час, питання впливу НВЧ ЕМВ на процес підготовки та регенерації природних сорбентів вивчене недостатньо.

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

Метою нашої роботи було вивчення параметрів сорбції іонів Цинку з водних систем на зразках природного сорбенту бентоніту після попередньої обробки його з використанням НВЧ ЕМВ.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Загальними фізико-хімічними характеристиками бентонітових глин є величина питомої поверхні, дисперсність (розмір частинок), бентонітове число (здатність до набухання), показник адсорбції, термостабільність тощо.

За хімічною природою бентоніти є складними алюмосилікатами, у яких присутні також оксиди заліза, лужних та лужноземельних металів. Загальна формула цих мінералів може бути подана як $[x(Al_2O_3)*y(SiO_2)]*z(OH)*m(H_2O)*n(MeO_k)$, де MeO_k – оксиди металів; x та y – коефіцієнти, що характеризують тип мінералу («у» іноді називається «силікатним модулем») [6].

За атомною структурою бентоніти – різновид алюмосилікатних каркасних матеріалів, які мають негативно заряджений тривимірний алюмосилікатний каркас зі строго регулярною структурою. У проміжках цього каркасу знаходяться гідратовані позитивні іони лужних і лужноземельних металів, які компенсують заряд каркасу, і молекули води. У адсорбційні порожнини цих матеріалів сорбується лише молекули речовин, критичний розмір яких менше ефективного розміру вхідного вікна [6].

З метою підсилення цінних властивостей бентонітів (у першу чергу сорбційних) їх часто піддають активації або модифікації, для чого використовують різні фізичні та хімічні методи. Внаслідок активації частково змінюється хімічний склад бентонітів, що призводить до збільшення питомої поверхні та її кислотності, зростання питомого об'єму пор, покращення термостабільності [6, 8].

В якості сорбенту в даній роботі досліджувався зразок природного бентоніту тонкого помолу, придбаний у загальній торговельній мережі («комерційний»); його точне місце походження невідоме.

Природний бентоніт є сумішшю багатьох мінералів – монтморилоніту, кварцу, хлориту, гідроліти тощо. Існує ряд методик його очистки (розділення на фракції), які вимагають значних затрат часу та додаткового обладнання [7, 8]. Оскільки кінцевою метою наших досліджень є мінімізація затрат на процес підготовки сорбенту до промислової очистки води, то у даній роботі ми використовували неочищений («комерційний») бентоніт.

Однак, для отримання загальної інформації про чистоту придбаного нами зразка сорбенту було проведено вивчення його складу за допомогою рентгенофазового аналізу. Зйомка дифрактограм нативного бентоніту (до спеціальної обробки його НВЧ ЕМВ) виконувалась методом порошку на дифрактометрі ДРОН-3 з використанням мідного відфільтрованого випромінювання. Якісний фазовий склад зразка визначався шляхом індексації піків hkl відповідних мінералів за їх табличними значення

d/n ; кількісний фазовий склад – за інтегральними інтенсивностями відповідних піків дифрактограми [9].

Сорбційні властивості бентоніту вивчали у статичних умовах. Досліджували як нативний («комерційний») зразок, так і попередньо підготовлений комбінованим способом: промивкою його дистильованою водою одночасно з дією НВЧ ЕМВ.

Відомо, що дія НВЧ ЕМВ на водні системи призводить до їх нагрівання. Тобто, такий спосіб попередньої обробки сорбентів поєднує у собі їх гідротермальну очистку з високочастотним опроміненням. Цей процес можна вважати і очисткою від природних забруднень, і активацією, і модифікацією, тому раніше нами було запропоновано вживати термін «стимуляція» [10].

Зокрема, для «стимуляції» нативного бентоніту його наважки масою 1,0 г поміщали у скляні колби місткістю 300 мл, заливали 25 мл дистильованої води та піддавали дії НВЧ ЕМВ середньої потужності протягом 180 сек. Після відстоювання отриманої суспензії залишки промивної води обережно знімали з сорбенту за допомогою вакуумної помпи.

В якості джерела НВЧ ЕМВ використовувався розроблений та виготовлений авторами генератор на магнетроні моделі М-10. Використано стандартну схему включення приладу – без імпульсного модулювання; діапазон випромінювання – 2,45 ГГц; номінальна потужність – 900 Вт, вихідна потужність – 790 Вт. Для кращого розподілення та концентрування випромінювання використовувалась рупорна антена, розрахована згідно відповідних методик [11].

Модельні розчини сульфату цинку («моделі») виготовляли із наважок цієї солі марки «ч» та дистильованої води. Для стабілізації іонів Zn^{2+} у розчини додавали невеликі кількості нітратної кислоти до отримання рН ~ 4. Робочі розчини отримували із модельних шляхом кратних розбавлень дистильованою водою.

У згадані вище колби з нативним або НВЧ-підготовленим бентонітом заливали по 250 мл робочого розчину та виконували процес сорбційної очистки: 3-разове перемішування та відстоювання. Загальна тривалість контакту бентоніту та розчину становила близько 24 годин.

Концентрації іонів Zn^{2+} у модельних та робочих розчинах визначались атомно-абсорбційним методом на спектрометрі ААС-115М-1. Окремі проби робочих розчинів (внутрішньо-лабораторний контроль) вивчались на вміст іонів Цинку за методикою фотометричного визначення цього іону з дитизоном із використанням електрофотокolorиметра КФК-2 [12].

Основна частина експериментальних досліджень (підготовка сорбенту, виготовлення модельних і робочих розчинів, безпосередньо процес сорбційної очистки тощо) проводилась у НДЛ екобезпеки ЛДУ БЖД. Вибіркові проби робочих розчинів досліджувались на вміст іонів Цинку у лабораторії Львівської обласної СЕС (зовнішньо-лабораторний

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

контроль).

Опрацювання експериментальних результатів - побудову ізотерм адсорбції, їх графічну та аналітичну обробку, розрахунки адсорбційних параметрів – здійснювали за класичними методиками: Ленгмюра, Фрейндліха, Дубініна-Радускевича та ін. [13]. Використано стандартні математичні процедури пакету Microsoft Office Excel та деякі власні програмні розробки авторів.

Дифрактограма нативного зразка бентоніту (CuK_{α} – випр.) після відповідної цифрової обробки та фазового аналізу наведена на рис. 1.; розрахунок цієї дифрактограми – у табл. 1.

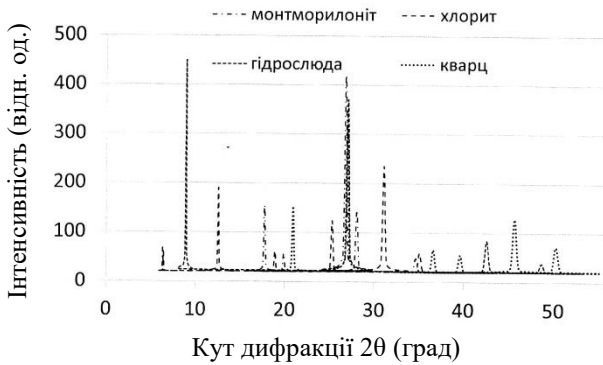


Рисунок 1 – Дифрактограма нативного зразка бентоніту, розділена за результатами фазового аналізу

Таблиця 1 – Розрахунок дифрактограми нативного зразка бентоніту

2θ, град	d_{hkl} , Å	Інтенсивність, відн. од.	Фаза (мінерал)
6,33	13,82	50	монтморилоніт
6,42	14,00	45	хлорит
8,93	10,00	430	гідрослюда
12,58	7,08	170	хлорит
17,75	4,99	135	монтморилоніт
18,92	4,69	42	хлорит
19,92	4,45	37	монтморилоніт
20,95	4,24	133	кварц
23,18	3,86	15	кальцит
25,32	3,53	104	хлорит
26,82	3,35	400	монтморилоніт
27,02	3,28	300	кварц
27,08	3,32	350	гідрослюда
28,07	3,18	126	монтморилоніт
29,56	3,03	114	кальцит
31,10	2,88	215	хлорит
34,68	2,58	28	монтморилоніт
35,10	2,56	39	хлорит
36,18	2,48	42	кальцит
36,62	2,45	46	кварц
39,58	2,28	23	кальцит
39,62	2,26	35	кварц
42,58	2,13	64	гідрослюда
45,68	1,98	109	кварц

48,68	1,87	18	гідрослюда
-------	------	----	------------

Як видно з дифрактограми і таблиці, за результатами фазового аналізу нативного зразка бентоніту встановлено, що у його складі у приблизно рівних кількостях присутні 4 мінерали: гідрослюда (бл. 27% ат.); монтморилоніт (бл. 25 % ат.); кварц (бл. 22 % ат.) та хлорит (бл. 20 % ат.); серед домішок - кальцит, силвініт та інші мінерали.

Порівняльний аналіз ізотерм адсорбції іонів Цинку з модельних розчинів на 2-х зразках бентоніту – нативному та опромінену НВЧ ЕМВ - показав наступне.

Загальний вигляд кривих на графіках залежності величини адсорбції від концентрації іонів Цинку в робочих розчинах ($q_e = f(C_e)$; рис. 2) в області малих концентрацій іонів Цинку в обох випадках мало відхиляється від прямої лінії, що відповідає закону Генрі [13].

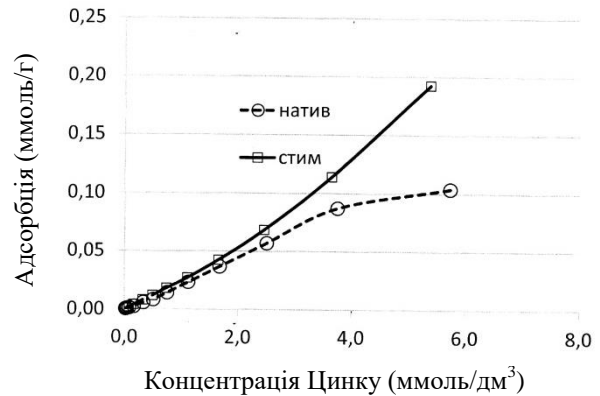


Рисунок 2 – Ізотерми адсорбції іонів Zn^{2+} на двох зразках бентоніту: нативному та опромінену НВЧ ЕМВ у поєднанні з гідротермальною промивкою («стимульованому»).

Однак, в області концентрацій Цинку більше 2 ммоль/дм³ графік сорбції на «стимульованому» зразку має тенденцію до прискореного зростання. Тобто, ця ізотерма адсорбції набуває характерного «S»-типу, що є типовим явищем у випадку глинистих сорбентів [4, 13, 14].

Як правило, під час досліджень сорбційних процесів проводять розрахунок ізотерм за кількома моделями, і за значеннями критеріїв статистичної оцінки ідентифікації вибирають модель, яка найкоректніше описує модель. Зокрема, у теорії Ленгмюра прийнято, що сорбція відбувається у мономолекулярному шарі. При цьому всі сорбційні центри вважаються ідентичними, а поверхня – однорідною. У той же час, ізотерма Фрейндліха добре описує сорбцію на гетерогенній поверхні з неоднорідними сорбційними центрами.

Авторами було виконано розрахунок обох ізотерм за згаданими моделями. Величина адсорбції розраховувалась за єдиною формулою 1:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} V \quad (1)$$

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

де q_e – рівноважна сорбційна ємність, ммоль/г; C_0 та C_e – концентрації іонів Цинку до та після сорбції, ммоль/л; m – маса навашки бентоніту, г; V – об’єм робочого розчину, dm^3 .

У випадку нативного зразка краще співпадіння отриманих та розрахованих параметрів сорбції показала модель Ленгмюра (формула 2):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_\infty K} + \frac{1}{q_\infty} C_e \quad (2)$$

де q_∞ – гранична сорбційна ємність, ммоль/г; K – константа сорбційної рівноваги (безрозм.).

У випадку «стимульованого» бентоніту найбільш чітку залежність показала обробка ізотерми адсорбції за лінійними рівняннями моделі Френйдліха (формули 3, 4; рис. 3):

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

$$\lg q_e = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_e \quad (4)$$

де K_F – константа ізотерми Френйдліха, яка вказує граничну сорбційну ємність, ммоль/г; n – константа, що характеризує гетерогенність поверхні.

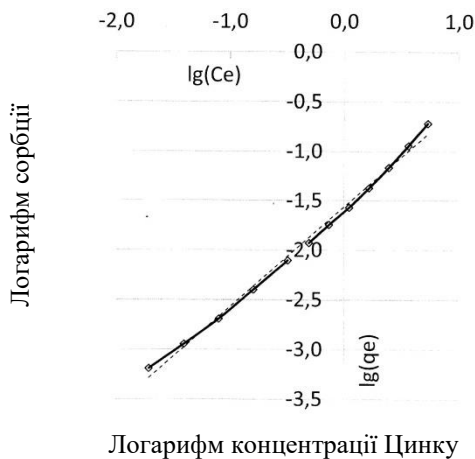


Рисунок 3 – Аналіз ізотерми сорбції іонів Цинку на «стимульованому» бентоніті за моделлю Френйдліха

Розраховані за рівняннями моделі Френйдліха сорбційні параметри показали, що гранична ємність (K_F) такого сорбенту за Цинком становить бл. 0,027 ммоль/г (або 1,78 мг/г). Значення аналогічного параметру для нативного бентоніту (за моделлю Ленгмюра) складає 0,019 ммоль/г (1,23 мг/г). Іншими словами, сорбційна здатність «стимульованого» бентоніту по відношенню до необробленого зростає у 1,5 рази.

Значення параметру n (рівняння 3 і 4), розраховане за моделлю Френйдліха, становить 0,99. Як відомо, цей параметр змінюється в межах від 0 до 1, і чим більше значення n , тим більш гетерогенна поверхня. Значення $n = 0,99$ означає, що поверхня дослідженого сорбенту є дуже гетерогенною. Описані вище результати рентгенофазового аналізу добре корелюють з цими

розрахунками: даний зразок бентоніту містить щонайменше 6 мінеральних фаз.

Порівнявши отримані авторами результати розрахунків сорбційної здатності бентоніту після обробки НВЧ ЕМВ із аналогічними параметрами нативного зразка, а також з відомими з літератури [3, 4, 10 та ін.] сорбційними характеристиками бентоніту, можна зробити наступні зауваження.

Механізм сорбції забруднень на глинистих матеріалах досить складний і включає цілий ряд фізико-хімічних процесів. У випадку сорбції неполярних молекул – це Ван-дер-Ваальсові взаємодії молекул сорбату з розвиненою поверхнею мікрокристалів алюмосилікатів; у випадку сорбції іонів або полярних молекул – кулонівська взаємодія заряджених частинок (або поляризованих молекул) сорбату з позитивно зарядженими ділянками поверхні сорбенту, що містять іони H^+ , Al^{3+} та інші.

Шаруватим алюмосилікатам, до яких належить і монтморилоніт (одна з основних складових бентоніту) властивий свій, особливий вид взаємодії з сорбатом. Основними механізмами сорбції на таких алюмосилікатах вважаються взаємодія поверхневих «сіольних» груп сорбенту ($\equiv Si-OH$) з іонами сорбату, або заміна цими іонами власних іонів Ca^{2+} та Mg^{2+} у кристалічній ґратці мінералу.

Відомо також, що при наявності молекул води у сорбенті взаємодія електромагнітного випромінювання з поляризованими частинами (алюмосилікатним каркасом та «сіольними» групами) діелектричного в цілому сорбенту має свою специфіку. Зокрема, диполі води та наявних у ній домішок постійно змінюють орієнтацію в просторі за напрямом ліній електричного поля. При цьому кристалічна решітка мінералу відчуває напруження уздовж магнітних силових ліній, внаслідок чого зменшуються міжмолекулярні сили у системі «сорбент-сорбат» і стає можливим вивільнення з кристалу обмінних катіонів або розриву «сіольних» груп.

Враховуючи отримані авторами результати, можна припустити, що спільна дія двох факторів – НВЧ-опромінення та гідротермальна деструкція поверхні – впливають на кристалічну структуру глинистого матеріалу, розподіл макро- та мікропор, активацію поглинаючої поверхні тощо, а це, у свою чергу, може призвести до зміни сорбційних параметрів.

Очевидно, в процесі опромінення мікрохвилями та при одночасній дії молекул води на поверхню кристалів сорбента змінюється співвідношення складових частин механізму сорбції. Зокрема, існує ймовірність, що крім активізації іонообмінного механізму (заміна іонів Ca^{2+} , Mg^{2+} або лужних металів на Zn^{2+} [4, 14]) посилюється ще й фізична сорбція іонів Цинку у новостворених мікропорах. Причому, температура, до якої нагрівається промивна вода під час «стимуляції», не є вирішальним фактором для активізації поглинаючої поверхні, а вирішальну роль відіграють частота випромінювання та тривалість цього процесу.

У будь-якому випадку можна стверджувати, що дія НВЧ-випромінювання на бентоніт з одночасною

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

гідротермальною деструкцією його поверхні значно покращує здатність сорбувати іони важких металів, зокрема, Цинку. У порівнянні з необробленим зразком, НВЧ-опромінений бентоніт має у 1,5 рази кращі сорбційні характеристики, тому може бути перспективним сорбентом для очистки природних та стічних вод від цих поллютантів.

Висновки про ступінь ефективності запропонованого нами способу попередньої підготовки сорбента з використанням НВЧ ЕМВ були б неповними без оцінювання енерговитрат на таку процедуру.

Як відомо, завдяки відносній дешевизні бентоніту та аналогічних глин, регенерація цих сорбентів класичними методами – прожарюванням, хімічною десорбцією тощо – є недоцільною. Після очистки певної кількості сорбату відпрацьований сорбент утилізується як добавка до будівельних матеріалів або аналогічним способом, хоча розробка простих та ефективних методик активації чи регенерації цих матеріалів могли б дати чималий економічний ефект.

На даний час типовими методами підготовки або регенерації сорбентів є їх прожарювання [4, 5, 14]. Зокрема, візьмемо за основу для розрахунків усереднені параметри нагрівальної установки: потужність печі $P = 5$ кВт/год, час нагрівання $\tau = 2,5$ год, загрузка $m = 2$ кг [5]. Провівши розрахунок енергозатрат процесу прожарюванням (E_1), приведеної до одиниці маси сорбенту (1 кг), отримуємо такі величини:

$$E_1 = P \cdot \tau / m = 5 \cdot 2,5 / 2 = 6,25 \text{ кВт/кг} \quad (4)$$

Для порівняння, у запропонованому нами методі $P = 0,9$ кВт, $\tau = 3$ хв (0,05 год); в установку можна загрузити до 100 г сорбенту ($m = 0,1$ кг):

$$E_2 = 0,9 \cdot 0,05 / 0,1 = 0,45 \text{ кВт/кг}, \quad (5)$$

що орієнтовно в 14 разів (на порядок) менше від енергоспоживання процесу регенерації сорбентів за методом прожарювання.

Вирішальними факторами у процесах попередньої підготовки сорбенту за допомогою НВЧ ЕМВ, очевидно, мають бути оптимальна потужність та час опромінення. Сам процес виготовлення та налаштування установки для НВЧ-опромінення є нескладним, затрати електроенергії під час її роботи відносно невеликі, тому економічна вигода від застосування такого методу може бути відчутна.

Зокрема, перспективною може бути наступна схема очистки стічних вод:

– сорбент у сухому вигляді загрузають у робочу ємкість з електроізолюючого матеріалу (наприклад, широка ванна з бетонованим дном без металевої арматури):

– додають невелику кількість чистої води (у перспективі – очищеної тією ж установкою) та перемішують до отримання однорідної суспензії;

– описаною вище НВЧ-установкою з виносною антеною опромінують суміш протягом певного часу, переміщуючи антену по всій площі ванни;

– після кількогодинного відстоювання зливають водну фракцію у прийомник-відстійник;

сорбент готовий до прийому основного потоку стічних вод.

Звичайно ж, до цього етапу стічна вода повинна бути позбавлена від механічних домішок за допомогою фільтрів або відстійників, тому що глинисті сорбенти не здатні сорбувати макрозабруднення.

Співвідношення кількостей чистої води, необхідної для НВЧ - підготовки сорбенту, і основного потоку стічної води, яку потрібно очистити (з розрахунку на певну масу сорбенту), може бути підібрано експериментально. У будь-якому випадку, передбачається, що ці об'єми будуть різнитись у декілька раз. Якщо врахувати, що запропонований спосіб підготовки сорбенту планується реалізовувати на відносно невеликих об'єктах, то і процес виготовлення НВЧ - установки, і об'єми згаданих (промивних) вод не повинні створювати значних проблем.

ВИСНОВКИ. Попереднє опромінення природного сорбенту бентоніту НВЧ ЕМВ одночасно з промивкою його чистою водою збільшує сорбційну ємність підготовленого таким чином зразка у 1,5 рази по відношенню до необробленого матеріалу. Причиною такого покращення сорбційної здатності даного матеріалу після опромінення його мікрохвилями у водному середовищі можуть бути зміни окремих кристалохімічних характеристик алюмосилікатного каркасу, активності гідроксильних груп та розподілу мікропор на поверхні кристалів цього сорбенту. Достатня простота у виготовленні НВЧ-установки та відносно мале її енергоспоживання (на порядок менше від типових методів регенерації сорбентів), можуть бути вирішальними факторами у створенні перспективних установок для ефективної очистки стічних вод невеликих об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води / Запольський А.К. – К.: Вища школа, 2005. – 671 с.
2. Набиванець Б.Й., Осадчий В.І., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Аналітична хімія поверхневих вод. – К.: Наукова думка, 2007. – 367 с.
3. Богданов В.К. Іонообмінна здатність бентонітових глин залежно від фізико-хімічних властивостей мінералу / Богданов В.К. // Український журнал дерматології, венерології, косметології. – 2009. – № 1. – С. 70–72.
4. Петрова М.А. Адсорбційно-бар'єрні властивості бентоніту Язівського родовища як матеріалу протифільтраційних екранів / Петрова М.А., Постнікова М.О., Степова К.В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – С. 36–41.
5. Рымарь С.И. Установка для регенерации сорбентов в электромагнитном поле / Рымарь С.И. – Вісник НТУ "ХПІ". – Харків, 2013. – № 33 (1066). – С.66-70.
6. Дистанов У.Г. Природные сорбенты СССР / Дистанов У.Г., Михайлов А.С., Конохова Т.П. и др. – М.: Недра, 1990. – 208 с.
7. Тарасевич Ю.И. Строение и химия

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

поверхности слоистых силикатов. – К.: Наукова думка, 1988. – 248 с.

8. Загордонський В., Василечко В., Сташук П., Гришук Г. Термодесорбція води й адсорбційні властивості закарпатських цеолітів // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. хім. 2004. Вип. 44. С. 247–256.

9. V.K. Pecharsky, P.Yu. Zavalij. Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. – Springer, USA, 2005. – 706 p.

10. Концур А.З. Сорбція біогенних аніонів на бентоніті, стимульованому надвисокочастотним електромагнітним випромінюванням / Концур А.З., Сиса Л.В. // Вісник ЛДУ БЖД. – Львів, 2016. – №13. – С. 87-92.

11. Кандырин Н.П. Выбор генераторов при

проектировании СВЧ синтезаторов с ФАПЧ // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2015. – № 8 (133). – С. 26-31.

12. Дмитриев М.М. Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ в окружающей среде. Справочник / Дмитриев М.Т., Казнина Н.И., Пинигина И.А. - М: Химия, 1989. – 348 с.

13. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – 2-е изд. /Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 306 с.

14. Василечко В. Сорбція Zn(II) на Закарпатському клиноптилоліті / В. Василечко, Г. Гришук, М. Сухнацький // Вісник Львівського університету. Серія хімічна. – Львів, 2011. – Вип. 52. – С. 148–158.

ANALYSIS OF ADSORPTION ISOTHERMS OF ZINC IONS ON BENTONITE AFTER PROCESSING IT WITH ULTRAHIGH-FREQUENCY RADIATION

L. Sysa, Yu. Rudyk, A. Kontsur

Lviv State University of Life Safety, Lviv

vul. Kleparivska, 35, Lviv, 79007, Ukraine. E-mail: teacher_leon@ukr.net

Purpose. This article provides research of adsorption characteristics of natural argillaceous material bentonite, processed by means of previously moisturizing and radiation with ultrahigh-frequency electromagnetic waves (i.e. “microwaves”). The research was aimed at studying the possibility to enhance efficiency of sorption purification of water from zinc ions by low cost sorbents. **Methodology.** Adsorption isotherms of zinc ions before and after irradiation by microwaves were obtained in static conditions on model solutions of zinc sulphate. We calculated adsorption parameters of bentonite, processed with the use of microwaves and native samples, by applying the Freundlich equation. **Results.** The boundary capacity of irradiated sorbent by zinc is approximately 0,027 mmol/g (or 1,78 mg/g), and for the native bentonite the value of the same parameter is 0,019 mmol/g (1,23 mg/g). The joint action of two factors – microwave irradiation and hydrothermal destruction of the surface of crystals – affects the surface structure of the clay material, the distribution of the macro and micropores, the activation of the adsorbing surface, which, in turn, leads to a change in the sorption parameters. After calculating the energy efficiency of the typical process of regeneration of sorbents – with calcination (E_1), reduced to the unit mass of the sorbent (1 kg), the estimated energy consumption was obtained: $E_1 = 6.25$ kW/kg. The method proposed by the authors uses the microwaves $E_2 = 0.45$ kW/kg, which is an order of magnitude smaller than the energy consumption in the method of calcination. **Originality.** For the first time, we have studied the impact of microwaves on efficiency of removal of zinc ions from water by sorption onto bentonite. **Practical value.** It is suggested to use such a method of preparation of sorbent before the main flow of contaminated water in the process of wastewater treatment of small establishments. *References 14, tables 1, figures 3.*

Key words: water purification, bentonite, zinc, microwaves.

REFERENCES

1. Zapolsky A.K. Vodopostachannya, vodovidvedennya ta yakist vody [Water supply, drainage and water quality]. Vyshcha Shkola, Kyiv, 2005. 671 p. (in Ukrainian).

2. Nabyvanets B.J., Osadchy B.I., Osadcha N.M., Nabyvanets Yu.B. Analychna khimiya poverkhnevnykh vod [Analytical chemistry of surface waters]. Naukova dumka, Kyiv, 2007. 367 p. (in Ukrainian).

3. Bohdanov V.K. Ionoobminna zdatnist bentonitovykh hlyn zalezchno vid fizyko-khimichnykh vlastyvostey mineralu [Ion-exchange ability of bentonite clay depending on the physical and chemical properties of the mineral]. *Ukrainsky zhurnal dermatolohii, venerolohii, kosmetolohii*, 2009, vol. 1, pp. 70-72. (in Ukrainian).

4. Petrova M.A., Postnikov M.O., Stepova K.V. Adsorbtsiyno-baryerni vlastyvosti bentonitu Yazivskoho rodovyshcha yak materialu

protyfiltratsiynykh ekraniv [Adsorption-barrier properties of bentonite of Yazivsky deposit as a material of anti-filtration screens]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2014, pp. 36-41.

5. Rymar S.I. Ustanovka dlya regeneratsii sorbentov v elektromagnitnom pole [Installation for regeneration of sorbents in an electromagnetic field]. *Visnyk NTU “KHPI”*, Kharkiv, 2013, vol. 33 (1066), pp. 66-70. (In Ukrainian).

6. Dystanov U.H., Mychaylov A.S., Konyuchova T.P. et all. Prirodnyye sorbenty SSSR [Natural sorbents of the USSR]. Nedra, Moscow, 1990. 208 p. (in Russian).

7. Tarasevych Yu.I. Stroyeniye i khimiya poverkhnosti sloistykh silikatov [The structure and chemistry of the surface of layered silicates]. Naukova dumka, Kyiv, 1988. 248 p. (in Ukrainian).

8. Zakordonsky V., Vasylechko V., Stashuk P., Hryshchuk H. Termodesorbtsiya vody y adsorbtsiyni

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

vlastyvoli zakarpatskykh tseolitiv [Thermal adsorption of water and adsorption properties of Transcarpathian zeolites]. *Visnyk Lvivskoho universytetu, seria khimichna*, 2004, vol. 44, pp. 247-256. (in Ukrainian).

9. Pecharsky V.K., Zavalij P.Yu., Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. Springer, USA, 2005. 706 p.

10. Kotsur A.Z., Sysa L.V. Sorbtsiya biohennykh anioniv na bentoniti, stymulovanomu nadvysokochastotnym elektromahnitnym vyrominyuvannyam [Sorbition of biogenic anions on bentonite, stimulated by ultrahigh-frequency electromagnetic radiation]. *Visnyk LDU BZHD*, Lviv, 2013, vol. 13, pp. 87-92. (in Ukrainian).

11. Kandyrin N.P. Vybor heneratorov pry proektyrovany SVCH syntezezatorov s FAPCH [The choice of generators for the design of microwave synthesizers with PLL]. *Systemy obrobky informatsiyi*,

2015, vol. 8 (133), pp. 26-31. (in Russian).

12. Dmytriev M.M., Kaznina N.I., Pinigina I.A. Sanitarno-khimicheskiy analiz zagryaznyayushchikh veshchestv v okruzhayushchey srede. Spravochnik [Sanitary and chemical analysis of pollutants in the environment. Directory]. Khimiya, Moscow, 1989. 348 p. (in Russian).

13. Greg S., Sing K. Adsorbtsiya, udelnaya poverkhnost, poristost [Adsorption, specific surface area, porosity] - 2nd ed., translated from English. Mir, Moscow, 1984. 306 p. (in Russian).

14. Vasylechko V., Hryshchuk H., Suchnackyy M. Sorbtsiya Zn(II) na Zakarpatskomu klynoptyloliti [Sorption of Zn(II) in Transcarpathian clinoptilolite]. *Visnyk Lvivskoho universytetu, seria khimichna*, 2011, vol. 52, pp. 148-158. (in Ukrainian).