

О. М. КАМІНСЬКИЙ

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-1971-8437

Р. О. ДЕНИСЮК

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-3077-3795

М. В. ЧАЙКА

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-5356-9856

С. В. ПИСАРЕНКО

доктор філософії з галузі знань хімічна та біоінженерія,
асистент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0002-5978-487X

О. С. ЄВДОЧЕНКО

доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-6338-5372

Д. Ю. ПАНАСЮК

асистент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0009-0005-9490-1823

АДСОРБЦІЙНА ОЧИСТКА ВОДИ ВІД ІОНІВ Cd(II) МАГНІТОЧУТЛИВИМ НАНОАДСОРБЕНТОМ Fe₃O₄/ГІДРОКСИАПАТИТ

В Україні як ніколи гостро стоїть проблема боротьби з наслідками стихійних забруднень навколишнього середовища, природних водойм та ґрунтів, а також харчових продуктів, зокрема питної води. Також потенційну небезпеку несуть забруднювачі воєнного походження (залишки снарядів, техніки, зброї тощо). Надзвичайно шкідливими забруднювачами є іони важких металів, наприклад Феруму, Купруму, Мангану, Кадмію та інших. Накопичення таких забруднювачів в організмі живих істот призводить до різноманітних патологій, розвитку та посилення захворювань. Однією з причин такого впливу іонів важких металів на живі організми є те, що їх досить важко вивести з організму, що тільки загострює проблему.

Відповідно до Директиви ЄС «Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption» одним із важливих харчових продуктів визнано питну воду, для якої прийняті стандарти вмісту важких металів, зокрема кадмію, та інших забруднювачів (барвники, пестициди, гербіциди тощо).

З метою вивчення можливості адсорбційного вилучення іонів Cd(II) з водних розчинів проведено синтез магнетиту золь – гель методом співсадження Елмора. Синтезовані зразки досліджено методами ТЕМ-мікроскопії та встановлено, що частинки Fe₃O₄ кулястої форми, схильні до утворення агрегатів. Розмір кристалітів становить 3–23 нм. Здійснено модифікування поверхні магнетиту гідроксиапатитом з метою одержання магніточутливого наноадсорбента щодо вилучення іонів Cd(II). За допомогою ТЕМ встановлено відсутність впливу модифікування поверхні магнетиту на розмір та морфологію частинок.

Здійснено порівняльний аналіз адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів поверхнями Fe₃O₄ та Fe₃O₄/гідроксиапатит. Встановлено, що ступінь вилучення понад 60,0 % іонів Cd(II) з водного розчину у діапазоні рН = 7,9–8,1 за

температури 293 К досягається за перші 60–90 хвилин від початку контакту адсорбат – адсорбент. Адсорбційна рівновага на межі поділу для обох поверхонь задовільно описується моделлю псевдо-другого порядку. Визначено, що адсорбційна ємність становить 21,1 та 22,3 мг/г для поверхонь Fe_3O_4 та Fe_3O_4 /гідроксиапатит відповідно. Показано, що ізотерми адсорбції задовільно описуються моделлю Ленгмюра, що вказує на мономолекулярну адсорбцію іонів $Cd(II)$ на енергетично однорідних центрах поверхні.

Ключові слова: магнетит, нанoadсорбент, адсорбція іонів важких металів, ізотерми адсорбції, моделі ізотерм.

O. M. KAMINSKIY

Ph.D. in Chemistry,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-1971-8437

R. O. DENYSIUK

Ph.D. in Chemistry,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-3077-3795

M. V. CHAYKA

Ph.D. in Chemistry,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-5978-487X

S. V. PYSARENKO

Ph.D. in the Field of Knowledge “Chemical and Bioengineering”,
Assistant at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-5978-487X

O. S. YEVDCHENKO

Ph.D. in the Field of Knowledge 01 Education/Pedagogy,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0001-6338-5372

D. YU. PANASIUK

Assistant at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0009-0005-9490-1823

ADSORPTION OF WATER FROM $Cd(II)$ IONS WITH MAGNETO-SENSITIVE NANOADSORBENT Fe_3O_4 /HYDROXYAPATITE

In Ukraine, the problem of combating the consequences of natural pollution of the environment, natural water bodies and soils, as well as food products, in particular drinking water, is more acute than ever. Contaminants of military origin (remnants of shells, equipment, weapons, etc.) also pose a potential danger. Extremely harmful pollutants are ions of heavy metals, such as Ferrum, Copper, Manganese, Cadmium and others. The accumulation of such pollutants in the body of living beings leads to various pathologies, the development and strengthening of diseases. One of the reasons for such an impact of heavy metal ions on living organisms is that they are quite difficult to remove from the body, which only exacerbates the problem.

In accordance with the EU Directive “Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption”, drinking water, for which the standards for the content of heavy metals have been adopted, is recognized as one of the important food products, in particular cadmium, and other pollutants (dyes, pesticides, herbicides, etc.).

In order to study the possibility of adsorption extraction of $Cd(II)$ ions from aqueous solutions, the synthesis of sol-gel magnetite was carried out by the Elmore co-precipitation method. The synthesized samples were examined by TEM-microscopy methods and it was established that Fe_3O_4 particles are spherical in shape, prone to the formation of aggregates. The size of the crystallites is 3–23 nm. The magnetite surface was modified with hydroxyapatite in order to

obtain a magnetically sensitive nanoadsorbent for the extraction of Cd(II) ions. With the help of TEM, it was established that there is no influence of magnetite surface modification on the size and morphology of the particles.

A comparative analysis of the adsorption of Cd(II) ions from aqueous solutions by Fe₃O₄ and Fe₃O₄/hydroxyapatite surfaces was carried out. It was established that the degree of extraction of more than 60.0% of Cd(II) ions from an aqueous solution in the range of pH = 7.9–8.1 at a temperature of 293 K is achieved in the first 60–90 minutes from the beginning of the adsorbate – adsorbent contact. The adsorption equilibrium at the separation boundary for both surfaces is satisfactorily described by the pseudo-second-order model. It was determined that the adsorption capacity is 21.1 and 22.3 mg/g for Fe₃O₄ and Fe₃O₄/hydroxyapatite surfaces, respectively. It is shown that the adsorption isotherms are satisfactorily described by the Langmuir model, which indicates monomolecular adsorption of Cd(II) ions on energetically homogeneous surface centers.

Key words: magnetite, nanoadsorbent, adsorption of heavy metal ions, adsorption isotherms, isotherm models.

Постановка проблеми

Забруднення води токсичними іонами важких металів було визнано серйозною екологічною проблемою в усьому світі. Багато видів діяльності призводять до забруднення водних ресурсів іонами металів, включаючи скидання стічних вод, сільськогосподарські стоки та промислові стоки від гальванопластики, обробки металу, шкіри та електроніки тощо.

Зокрема, наявність іонів Cd(II) у різних природних середовищах негативно впливає на здоров'я як людей, так і тварин. Основними джерелами потрапляння іонів Cd(II) у навколишнє середовище є продукти промислової, сільськогосподарської та побутової діяльності людини. Також можливими джерелами забруднення іонами важких металів, серед яких є Кадмій, є наслідки російської агресії та воєнні дії на території України.

Негативний вплив іонів Cd(II) в основному відбувається через споживання зараженої їжі та води, а також значною мірою через вдихання та куріння цигарок. Кадмій накопичується в рослинах і тваринах з тривалим періодом напіврозпаду близько 25–30 років. Епідеміологічні дані свідчать про те, що вплив іонів Cd(II) може бути пов'язаний з різними видами раку, включаючи рак молочної залози, легенів, простати, носоглотки, підшлункової залози та нирок. Печінка і нирки надзвичайно чутливі до токсичної дії Cd(II). Це може бути пов'язано зі здатністю цих тканин синтезувати металотіонеїни (МТ), які є Cd-індукованими білками, що захищають клітину шляхом міцного зв'язування токсичних іонів Cd(II). Окислювальний стрес, спричинений цим ксенобіотиком, може бути одним із механізмів, відповідальних за декілька захворювань печінки та нирок [1].

Одним із ефективних способів очистки природних водоем від стійких забруднювачів, таких як іони Cd(II), є технологія адсорбційного вилучення, а пошук сучасних екологічно та економічно доцільних адсорбентів залишається актуальною проблемою сьогодення.

Серед адсорбентів, які широко використовуються з метою очистки водоем від іонів важких металів, достойне місце займають магніточутливі наноадсорбенти, які володіють набором унікальних властивостей. Серед таких матеріалів досить поширеними є адсорбенти на основі магнетиту. Перевагою таких наноматеріалів є те, що вони мають добре розвинену поверхню, є доступними, не токсичними та володіють достатніми магнітними характеристиками, що дозволяють безпечно вилучати їх із середовища за допомогою зовнішнього магнітного поля [2–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі авторами [5] синтезовано нанорозмірний мезопористий адсорбент на основі магнетиту методом «зеленого» синтезу, використовуючи екстракт біовідходів шкірки солодкого лайму (*Citrus Limetta*). Одержаний наноадсорбент карбонізували за 500 °C і повністю охарактеризували за допомогою різних методів. Методами БЕТ визначено, що питома поверхня магнетитового наноадсорбенту дорівнює 81,28 м²/г, а середній діаметр пор знаходився у межах мезопористого діапазону. Магнетитовий наноадсорбент використано для адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів. Встановлено, що процеси адсорбції характеризуються моделлю Ленгмюра, а адсорбційну рівновагу можна описати моделлю псевдо-другого порядку, яка вказує на те, що у процесах адсорбції іонів Cd(II) на поверхні магнетиту домінувала хемосорбція. Встановлено, що адсорбційна ємність становить 48,54 мг/г. Після п'яти циклів десорбції, вилучення Cd(II) становило 72,09%, а елюент 0,01 М HCl десорбував 95,42% Cd(II) з поверхні наноадсорбенту.

Авторами [6] синтезовано магніточутливі нанокомпозити (металоорганічні каркаси) на основі магнетиту, а саме Fe₃O₄@ZIF-8 та Fe₃O₄@UiO-66-NH₂. Показано, що синтезовані магнітні наночастинки забезпечують високу ефективність адсорбції Cd(II) і Pb(II) із водних розчинів. Досліджено вплив різних факторів на процеси адсорбції іонів, включаючи значення pH розчину, час адсорбційного контакту, адсорбційну здатність, вплив температури та можливість повторного використання адсорбенту. Показано, що процес адсорбції відповідає кінетичній моделі псевдо-другого порядку та може бути описаним ізотермою Ленгмюра. В основі механізму адсорбції лежить комплексоутворення на поверхні. Крім того, термодинамічні дослідження показали, що процес адсорбції має ендотермічний і спонтанний характер. Встановлено, що протягом шести годин від початку контакту за pH 6,0 величина адсорбційної ємності для Fe₃O₄@ZIF-8 становить 666,7 мг/г для Pb(II), а для Cd(II) – 370 мг/г відповідно; а для Fe₃O₄@UiO-66-NH₂ адсорбційна ємність становить 833,3 мг/г для Pb(II),

а для Cd(II) – 714,3 мг/г відповідно (маса адсорбента становила 2,5 мг, об'єм розчину 10 мл, початкова концентрація іонів $C_0 = 10$ мг/л).

Проте, зустрічається недостатньо літературних джерел, що докладно описує процеси адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів поверхню магніточутливого наноадсорбенту Fe₃O₄/гідроксиапатит, що є актуальністю даної роботи.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є вивчення процесів адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів поверхні немодифікованого магнетиту та нанорозмірного адсорбента Fe₃O₄/гідроксиапатит.

Викладення основного матеріалу дослідження

З метою вивчення адсорбційної активності магніточутливого наноадсорбента Fe₃O₄/гідроксиапатит синтезовано магнетит золь-гель методом Елмора за методикою, описаною в [2].

Отриманий золь магнетиту осаджували в магнітному полі, промивали дистильованою водою. Методами електронної мікроскопії (Трансмісійний електронний мікроскоп (JEOL – 1230), Японія) встановлено, що частинки магнетиту кулястої форми схильні до утворення агрегатів, що характеризуються розмірами 3–23 нм (рис. 1, а). Середній розмір часток залежав від умов синтезу, розподілом за розмірами можна було керувати технологічно. Визначено, що концентрація активних –ОН груп поверхні становила 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні $S_{\text{шт}} = 90$ м²/г.

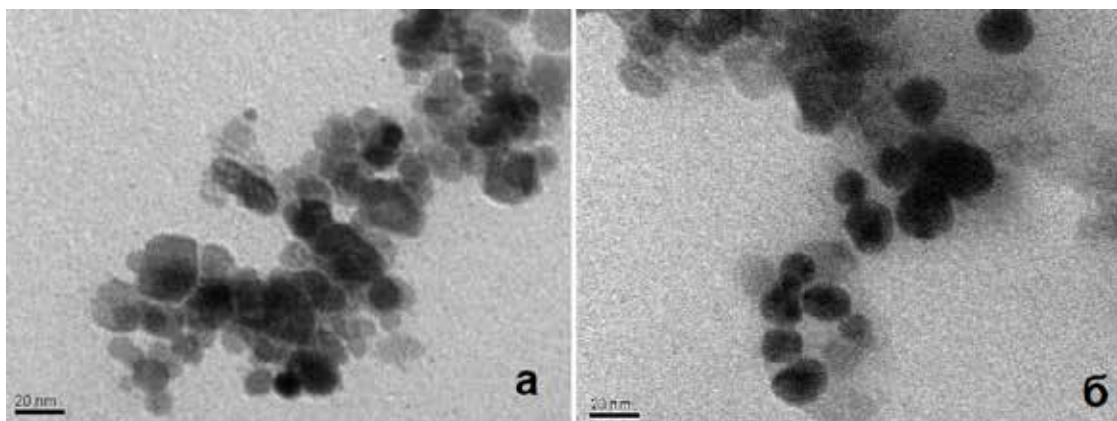
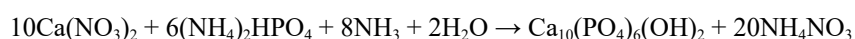


Рис. 1. ТЕМ зображення вихідного Fe₃O₄ (а) та наноадсорбенту Fe₃O₄/гідроксиапатит (б)

Для модифікування поверхні магнетиту гідроксиапатитом необхідну кількість вихідних компонентів розраховували таким чином, щоб молярне співвідношення Ca : P знаходилося в межах 1,7 : 1,5 [2, 4]. Процес формування на поверхні магнетиту шару гідроксиапатиту можна показати стехіометрією реакції:



Водні розчини 0,1 М Ca(NO₃)₂·4H₂O і 0,1 М (NH₄)₂HPO₄ окремо кожен доводили до pH = 11 водним розчином амоніаку (25%) (pH середовища визначали іонміром I-160M). Наважку магнетиту масою 5 г поміщали в розчин Ca(NO₃)₂ та залишали на 1 годину. Потім поступово додавали розчин (NH₄)₂HPO₄ та ретельно перемішували суміш скляною паличкою до утворення густого біло-сірого гелю. Далі реакційну суміш періодично перемішували протягом 1 години при нагріванні на електричній плитці до 100 °С, потім залишали на 24 години.

Утворений наноадсорбент Fe₃O₄/гідроксиапатит промивали дистильованою водою до нейтрального pH і відокремлювали за допомогою постійного магніту та висушували у сушильній шафі протягом 8 годин. Одержаний наноконкомпозит містив активні –ОН групи поверхні, концентрація яких становила 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні $S_{\text{шт}} = 110$ м²/г. Методом ТЕМ-мікроскопії показано, що середній розмір частинок наноадсорбенту становив 25–30 нм, а морфологія частинок при цьому не відрізнялася від вихідного магнетиту (Рис. 1, б).

Для вивчення процесів адсорбції іонів Cd(II) з розчинів готували розчини з концентраціями 10–200 мг/л іонів шляхом відважування солі Cd(NO₃)₂·4H₂O (марки «х.ч.») на аналітичних вагах та доведення потрібної наважки дистильованою водою до мітки у мірній колбі на 250 мл.

Для проведення кінетичних досліджень відважували на електронних вагах по 0,03 г зразків, додавали 5 мл розчину з $C_0(\text{Cd(II)}) = 200$ мг/л та перемішували на шейкері. Діапазон часу контакту між розчином та адсорбентом становив: 5, 10, 30, 45, 60 та 90 хв. Температура, за якої проводилось дослідження, становила 293К.

Адсорбцію здійснювали у статичному режимі при pH = 7,9–8,1 за кімнатної температури. До 0,03 г адсорбенту додавали 5 мл розчину солі відповідної концентрації і струшували протягом 90 хвилин на шейкері, потім розчин відділяли від адсорбенту за допомогою постійного неодимового магніту.

Адсорбційну ємність (A) на поверхні вихідного та модифікованого магнетиту визначали вимірюванням концентрації іонів в розчинах до і після адсорбції із застосуванням атомно-абсорбційного спектрофотометра С – 115 МІ у полум'яній суміші ацетилен-повітря за довжини хвилі аналітичного випромінювання лампи 228,8 нм.

Ємність адсорбентів A (мг/г) розраховували за формулою:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

де C_0 і C_p – концентрація вихідного розчину та розчину після адсорбції (мг/л), V – об'єм розчину (л), m – наважка адсорбенту (г).

Ступінь вилучення R , % іонів Кадмію(II) з водних розчинів розраховували за формулою:

$$R = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

Для обробки одержаних ізотерм адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів використано математичні моделі адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха та Тьомкіна [7–8].

На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення іонів Cd(II) з розчину поверхнею чистого магнетиту та нано-адсорбенту Fe₃O₄/гідроксиапатит.

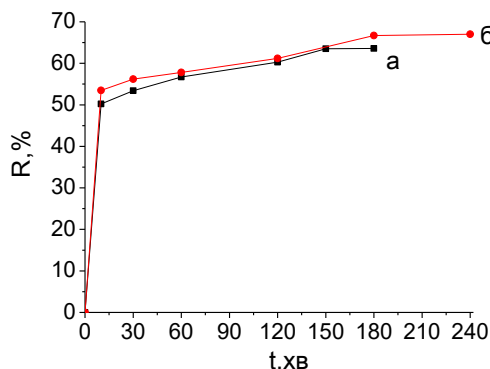


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення іонів Cd(II) з розчину поверхнею чистого Fe₃O₄ (а) та наноадсорбенту Fe₃O₄/гідроксиапатит (б)

Встановлено, що за перші 60–90 хвилин від початку контакту адсорбат-адсорбент вилучається 67,0% іонів Cd(II) з водного розчину поверхнею Fe₃O₄/гідроксиапатит, тоді як ступінь вилучення іонів Cd(II) для поверхні магнетиту становить 63,4% у діапазоні рН = 7,9–8,1. Адсорбційна рівновага досягається протягом 60 хвилин від початку контакту на межі поділу для обох поверхонь та задовільно описується моделлю псевдо-другого порядку, що вказує на міжчастинкову взаємодію між іонами адсорбату. Лімітуючою стадією в даному випадку є хімічна реакція обміну між частинками на межі поділу «адсорбат-адсорбент».

На рис. 3 зображено ізотерми адсорбції іонів Cd(II) поверхнями чистого Fe₃O₄ та наноадсорбенту Fe₃O₄/гідроксиапатит.

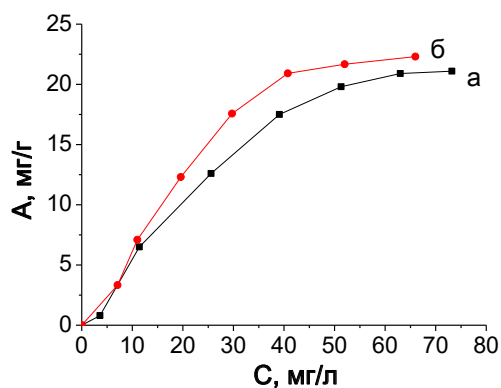


Рис. 3. Ізотерми адсорбції іонів Cd(II) з розчину поверхнею чистого Fe₃O₄ (а) та наноадсорбенту Fe₃O₄/гідроксиапатит (б)

Як видно з рис. 3, характер кривих ізотерм адсорбції іонів Cd(II) водних розчинів відносяться до L – типу ізотерм Ленгмюра з виходом на насичення відповідно до класифікації ізотерм за Гільсом. Такий тип ізотерм вказує на те, що міжмолекулярна взаємодія адсорбат – адсорбент переважає над взаємодією адсорбат – адсорбат, що є типовими для мономолекулярної адсорбції. Адсорбційна ємність становить 21,1 та 22,3 мг/г для поверхонь Fe₃O₄ та Fe₃O₄/гідроксиапатит відповідно.

У табл. 1 наведено розрахункові дані у відповідності до математичних моделей ізотерм адсорбції іонів Cd(II) з розчину поверхнями магніточутливих адсорбентів.

Таблиця 1

Розрахункові дані у відповідність до математичних моделей ізотерм адсорбції

Fe ₃ O ₄		
Модель Ленгмюра		
A _{max} , мг/г	K _L , л/мг	R ²
21,0±0,4	0,155±0,027	0,997
Модель Фрейндліха		
n	K _F	R ²
3,63±0,23	2,248±0,051	0,979
Модель Тьомкіна		
b _T	K _T	R ²
7,230±0,436	0,266±0,056	0,979
Fe ₃ O ₄ /гідроксиапатит		
Модель Ленгмюра		
A _{max} , мг/г	K _L , л/мг	R ²
29,0±2,1	0,042±0,004	0,984
Модель Фрейндліха		
n	K _F	R ²
1,71±0,11	1,349±0,072	0,978
Модель Тьомкіна		
b _T	K _T	R ²
3,138±0,541	0,206±0,037	0,979

Одержані розрахункові дані дозволяють стверджувати, що адсорбція іонів Cd(II) з розчину обома поверхнями добре описується моделлю ізотерм Ленгмюра, на що вказують коефіцієнти кореляції, які становлять понад 0,98. Це означає, що іони з розчинів адсорбуються на гомогенних енергетично однорідних центрах поверхні, на якій може утворюватись лише мономолекулярний шар адсорбату.

Висновки

У роботі проведено синтез магнетиту золь-гель методом Елмора. Методами ТЕМ-мікроскопії встановлено, що частинки Fe₃O₄ кулястої форми та схильні до утворення агрегатів. Розмір кристалітів становив 3–23 нм. Проведено модифікування поверхні магнетиту гідроксиапатитом з метою одержання магніточутливого нанoadсорбента. За допомогою ТЕМ показано, що модифікування поверхні магнетиту не вплинуло на розмір та морфологію частинок.

Проведено адсорбцію іонів Cd(II) з водних розчинів поверхнями Fe₃O₄ та Fe₃O₄/гідроксиапатит. Встановлено, що за перші 60–90 хвилин від початку контакту адсорбат – адсорбент вилучається 67,0% іонів Cd(II) з водного розчину поверхнею Fe₃O₄/гідроксиапатит, тоді як ступінь вилучення іонів Cd(II) для поверхні магнетиту становить 63,4% у діапазоні рН = 7,9–8,1. Адсорбційна рівновага на межі поділу для обох поверхонь задовільно описується моделлю псевдо-другого порядку. Встановлено, що адсорбційна ємність становить 21,1 та 22,3 мг/г для поверхонь Fe₃O₄ та Fe₃O₄/гідроксиапатит відповідно. Показано, що ізотерми адсорбції задовільно описуються моделлю Ленгмюра, що вказує на мономолекулярну адсорбцію іонів Cd(II) на енергетично однорідних центрах поверхні. Показано перспективність використання Fe₃O₄/гідроксиапатит у якості нанoadсорбенту для очистки води від іонів Cd(II).

Список використаної літератури

- Genchi G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A., Catalano A. The effects of cadmium toxicity. *J. Environ. Res. Public Health*. 2020. Vol. 17, No 11. P. 3782. DOI: 10.3390/ijerph17113782
- Petranovska A. L., Abramov N. V., Turanska S. P., Gorbyk P. P., Kaminskiy A. N., Kussyak N. V. Adsorption of cis dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *J. Nanostruct. Chem.* 2015. Vol. 5, No 3. P. 275-285. DOI: 10.1007/s40097-015-0159-9.

3. Azeez N. R., Salih S. S., Kadhom M., Mohammed H., N., Ghosh T. K. Enhanced termination of zinc and cadmium ions from wastewater employing plain and chitosan-modified mxenes: Synthesis, characterization, and adsorption performance. *Green Chemical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.gce.2023.08.003.

4. Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Писаренко С. В., Панасюк Д. Ю. Сорбція йонних форм Цинку(II) з водних розчинів поверхніма магніточутливих нанокмполітів, модифікованих гідроксиапатитом. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 5. С. 70-79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8.

5. Chander S., Yadav S., Rai Sharma H., Gupta A. Sequestration of Cd (II) utilizing biowaste-fabricated recyclable mesoporous magnetite (Fe₃O₄) nano-adsorbent: Process optimization, thermodynamic investigation, simulation modeling, and feasibility for electroplating effluent. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 986. 174088. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.174088.

6. Abdel-Magied A. F., Abdelhamid H. N., Ashour R. M., Fu L., Dowaidar M., Xia W., Forsberg K. Magnetic metal-organic frameworks for efficient removal of cadmium(II), and lead(II) from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, No 3. 107467. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107467

7. Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100

8. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341-350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038.

References

1. Genchi G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A., Catalan A. The effects of cadmium toxicity. *J. Environ. Res. Public Health*. 2020. Vol. 17, No 11. P. 3782. DOI: 10.3390/ijerph17113782

2. Petranovska A. L., Abramov N. V., Turanska S. P., Gorbyk P. P., Kaminskiy A. N., Kussyak N. V. Adsorption of cis dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *J. Nanostruct. Chem*. 2015. Vol. 5, No 3. P. 275-285. DOI: 10.1007/s40097-015-0159-9.

3. Azeez N. R., Salih S. S., Kadhom M., Mohammed H., N., Ghosh T. K. Enhanced termination of zinc and cadmium ions from wastewater employing plain and chitosan-modified mxenes: Synthesis, characterization, and adsorption performance. *Green Chemical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.gce.2023.08.003.

4. Kaminskyi O. M., Denysiuk R. O., Chaika M. V., Pysarenko S. V., Panasiuk D. Yu. Sorbtsiia yonnykh form Tsynku(II) z vodnykh rozchyniv poverkhniamy mahnitochutlyvykh nanokompozytiv, modyfikovanykh hidroksyapatytom. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk*. 2023. № 5. S.70-79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8.

5. Chander S., Yadav S., Rai Sharma H., Gupta A. Sequestration of Cd (II) utilizing biowaste-fabricated recyclable mesoporous magnetite (Fe₃O₄) nano-adsorbent: Process optimization, thermodynamic investigation, simulation modeling, and feasibility for electroplating effluent. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 986. 174088. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.174088.

6. Abdel-Magied A. F., Abdelhamid H. N., Ashour R. M., Fu L., Dowaidar M., Xia W., Forsberg K. Magnetic metal-organic frameworks for efficient removal of cadmium(II), and lead(II) from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, No 3. 107467. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107467

7. Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100

8. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341-350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038/