

УДК 544.723.5+546.19+628.161

*М.І. Літинська, Н.М. Толстопалова, І.М. Астрелін, Н.В. Петрус***ВПЛИВ СТОРОННІХ ІОНІВ НА АДСОРБЦІЮ АРСЕНАТУ НА ФЕРУМ(III) ОКСИДАХ І ГІДРОКСИДАХ****Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Для природних вод багатьох країн характерним є підвищений вміст Арсену, не є винятком і Україна. Концентрація As в питній воді, вища за 10 мкг/дм³, призводить до численних небажаних наслідків (гіперкератозу, раку, різноманітних захворювань), що робить необхідним розробку нових та удосконалення існуючих методів деарсенізації. Ферумвмісні адсорбенти є одними з найбільш використовуваних для очищення вод від сполук Арсену. Як природні, так і стічні води мають складну мінеральну композицію, тому дослідження впливу сторонніх іонів є актуальним. В статті розглянуто вплив аніонів (хлоридів, сульфатів, гідрокарбонатів), катіонів (натрію, кальцію) та рН на адсорбцію арсенату на синтезованих гетиті, гематиті та феригідриті. Вплив хлоридів є неоднозначним і у випадку ферум(III) оксиду та гідроксиду відбувається підвищення ефективності адсорбції арсенату. Сульфати та гідрокарбонати суттєво погіршують видалення арсенату для всіх досліджених ферумвмісних сорбентів. В діапазоні рН модельної води від 6 до 8 вплив хлоридів та сульфатів практично не змінюється, тоді як зі зростанням рН присутність гідрокарбонатів значно погіршує процес. З цього можна зробити висновок, що високі концентрації сульфатів і гідрокарбонатів є небажаними у воді, що очищається від сполук Арсену за допомогою ферумвмісних адсорбентів.

Ключові слова: арсенати, хлориди, сульфати, гідрокарбонати, ферум(III) оксигідроксид, гетит, ферум(III) оксид.

DOI: 10.32434/0321-4095-2019-124-3-22-29

Вступ

Для всіх сполук Арсену властивою є висока токсичність, яка варіюється в залежності від ступеня окиснення As та природи речовини (органічна чи неорганічна). Високий вміст Арсену характерний для стічних вод металургійних та гірничих підприємств, виробництв арсеновмісних напівпровідників, пігментів, харчових добавок, тощо, а також для природних вод багатьох країн, серед яких Китай, Індія, Пакистан, Іран, Тайвань, В'єтнам, Мексика, Чилі та ін. [1]. Зустрічаються арсеновмісні природні води і в Україні. За даними [1,2] 70% природних вод, а саме 17 проб підземних та 5 зразків поверхневих українських вод, не відповідають вимогам до вмісту Арсену у питній воді. Особливо гострою є ситуація в районі Рахівсько-Тисинського розлому, де концентрація Арсену в підзем-

них водах може досягати 40000 мкг/дм³, тоді, як згідно з українськими і міжнародними нормативними документами, максимальна допустима концентрація Арсену в питній воді становить 10 мкг/дм³ [3]. Вживання питної води з підвищеним вмістом Арсену призводить до чисельних проблем зі здоров'ям людини: гіперкератозу, меланозу, раку шкіри та внутрішніх органів, неврологічних та ендокринних розладів, тощо [1,4]. У населення в зоні Рахівсько-Тисинського розлому спостерігається значно вища, ніж в сусідніх регіонах, захворюваність серцево-судинної та ендокринної системи, а також більша частота випадків онкологічних захворювань [5]. Отже, удосконалення існуючих і розробка нових методів очищення води від сполук Арсену є доцільним як в Україні, так і в багатьох інших країнах світу.

Вилучення сполук Арсену можна здійснювати різними методами, до яких належать методи осадження, такі як коагуляція/фільтрація, вапняне пом'якшення; адсорбція, іонний обмін, мембранні процеси (мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос) тощо [1,6]. Але адсорбція є одним з найпопулярніших методів деарсенізації, оскільки споживає значно менше електроенергії, ніж зворотний осмос, та має значно менше відходів, ніж коагуляція, зворотний осмос та іонний обмін. Ферумвмісні адсорбенти є одними з найбільш використовуваних для очищення води від сполук Арсену, оскільки в процесі відбувається іммобілізація Арсену у вигляді практично нерозчинних сполук [7–10].

Як природні, так і стічні води мають складну мінеральну композицію, тому дослідження впливу сторонніх іонів є актуальним. В статті розглянуто вплив аніонів (хлоридів, сульфатів, гідрокарбонатів), катіонів (натрію, кальцію) та рН на адсорбцію арсенату на синтезованих гетиті, гематиті та феригідриті.

Методика експерименту

У дослідженнях використовували наступні сорбенти: порошок ферум оксигідроксид FeOОН, осаджений методом термічного гідролізу карбаміду з розчину FeCl₃, порошок аморфний ферум гідроксид Fe(OH)₃, осаджений розчином аміаку із концентрованого розчину FeCl₃, та порошок ферум(III) оксид α -Fe₂O₃, одержаний прожарюванням аморфного ферум(III) гідроксиду [9,10].

Для синтезованих зразків сорбенту було одержано дифрактограми за допомогою рентгеновського апарату Rigaku Ultima IV.

Як джерело As(V) було використано сіль Na₂HAsO₄·7H₂O (Sigma) з чистотою згідно з сертифікатом якості 99,5%. Сорбційні дослідження проведено для розчинів з вмістом As(V) 2000 мкг/дм³. Адсорбція здійснювалась в об'ємі розчину 200 см³. Рациональну дозу сорбентів обрано за рН модельного розчину 7. Дози сорбенту (порошкового оксигідроксиду) становили 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 та 0,35 г/дм³. Тривалість сорбції на шейкері – 120 хв. Подальші експерименти здійснювались за дози сорбенту нижчої за рациональну (0,25 г/дм³), оскільки для дослідження позитивного впливу сторонніх іонів необхідно, щоб поточний ступінь вилучення був нижчим за 100% при рационально підбраній дозі.

Досліджено вплив сторонніх аніонів (хлоридів, сульфатів і гідрокарбонатів) та катіонів (натрію та кальцію) на сорбцію As(V) з водного

середовища. Використано модельні води з концентрацією 2000 мкг/дм³ As(V) у вигляді арсенату та з концентрацією солей 0,2 моль-екв/дм³ (рН розчину становив 7). Модельні розчини було приготовано на дистильованій воді, рН доведено до потрібного значення за допомогою розчинів HCl або NaOH з концентрацією 0,1 моль/дм³. Доза сорбенту – 0,25 г/дм³. Тривалість адсорбції на шейкері становила 5, 10, 20, 40, 90, 120 хв. Також було досліджено вплив рН на сорбцію для сорбенту FeOОН. Готувались аналогічні модельні води з іншими значеннями рН: 6; 7 та 8.

Вміст Арсену у фільтраті після сорбції визначався фотометрично у вигляді синього розчину продукту відновлення арсеномолібденової гетерополікислоти. До мірних колб об'ємом 50 см³ з відбраною аліквотою фільтрату додається 25 см³ розчину йоду з концентрацією 0,0005 моль/дм³, суміш перемішується та залишається на 1–2 хв. Потім додається 10 см³ змішаного реактиву, який складається з розчину аскорбінової кислоти та кислого розчину амоній молібдату приготованого згідно з ГОСТ 4152-89. Вміст колби перемішується, нагрівається на водяній бані, охолоджується, доводиться до мітки дистильованою водою, знову перемішується. Потім вимірюється оптична густина одержаних розчинів відносно холостого зразка за довжини хвилі 840 нм. Масовий вміст Арсену знаходиться з калібрувального графіка.

Результати та обговорення

Структура сорбентів була встановлена рентгенофазовим дослідженнями (рис. 1). Рис. 1,а демонструє чіткі піки, які відповідають фазі α -Fe₂O₃, тобто зразок є синтетичним гематитом. Рис. 1,б підтверджує аморфну структуру зразка, тобто цей сорбент дійсно є аморфним ферум(III) гідроксидом – феригідритом. На рис. 1,в чітко спостерігаються піки, які відповідають FeOОН, отже, цей сорбент є синтетичним гетитом.

Саме такі сполуки феруму(III), як гідроксид, оксид та оксигідроксид, є часто використовуваними компонентами різноманітних сорбентів як у вигляді самостійних речовин, так і в нанесеному стані. Тому доцільно досліджувати вплив сторонніх іонів саме на ці сполуки. Для зручності експерименту ці ферумвмісні речовини використовувались у порошковому вигляді.

Рациональною дозою, що дозволяє очистити розчин арсенату з концентрацією 2000 мкг As(V)/дм³ до концентрацій нижче нормативних, встановлено 0,3 г/дм³. Але подальші дослідження здійснювались за дози сорбенту нижчої за рациональну (0,25 г/дм³) для можливості спо-

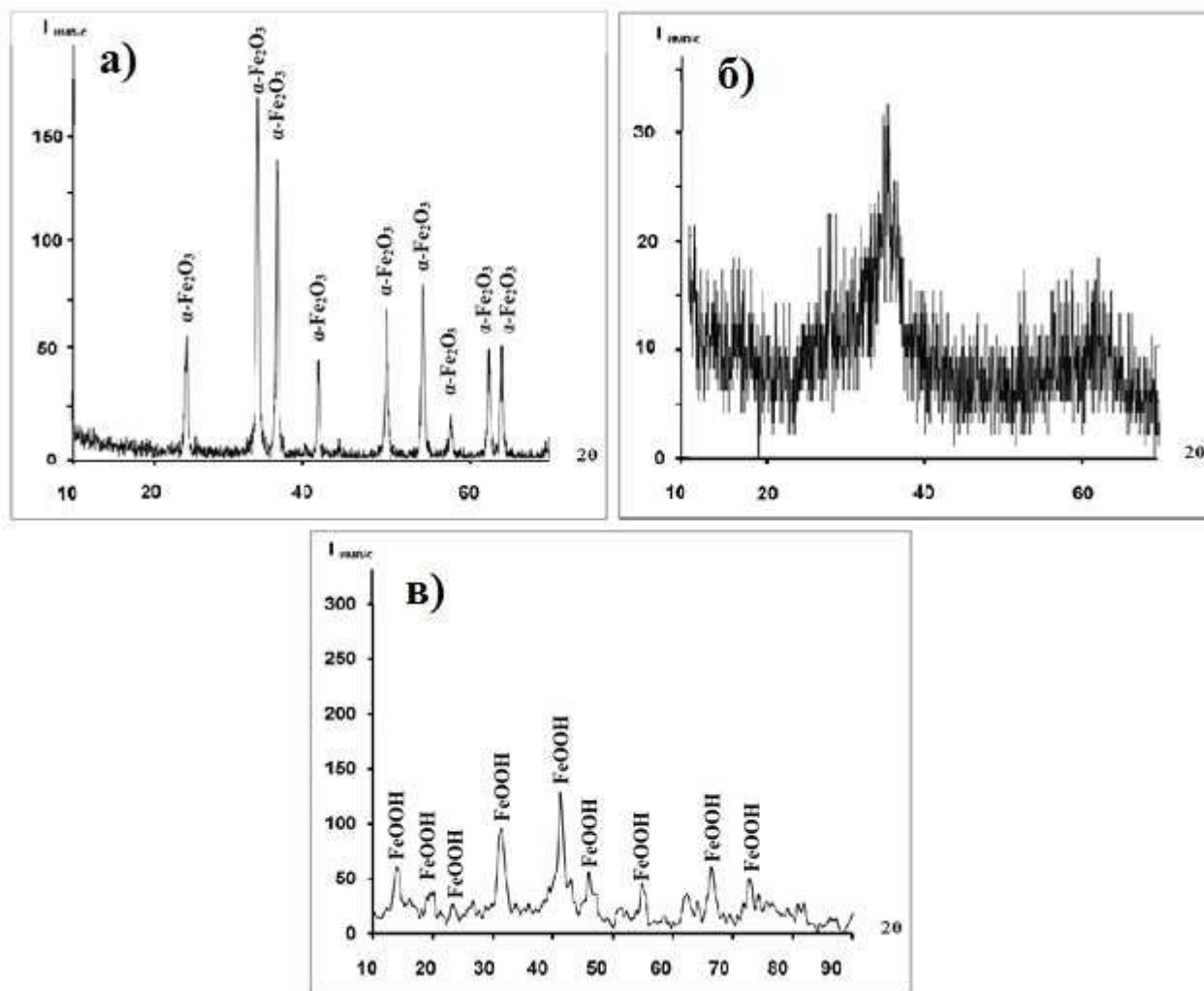


Рис. 1. Дифрактограми зразків досліджуваних сорбентів: а – оксидний сорбент; б – гідроксидний сорбент; в – оксид-гідроксидний сорбент

стереження позитивного впливу сторонніх іонів та рН.

На рис. 2 наведено залежності, які ілюструють вплив сторонніх аніонів на ефективність адсорбції.

З наведених даних можна зробити висновок, що для сорбентів $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та $\text{Fe}(\text{OH})_3$ хлориди мають позитивний вплив на процес вилучення $\text{As}(\text{V})$ з модельної води, а сульфат- та гідрокарбонат-іони – негативний вплив. У випадку FeOOH ступінь вилучення $\text{As}(\text{V})$ з модельної води без сторонніх домішок є максимальним; хлорид-, сульфат- та гідрокарбонатіони мають негативний вплив на процес сорбції.

Процес адсорбції відповідає псевдо-другому порядку, що підтверджує перебіг хемосорбції. Для псевдо-другого порядку характерним є наступне кінетичне рівняння:

$$\frac{dq}{dt} = k \cdot (q_e - q)^2,$$

де k – константа швидкості; q_e – рівноважна питома адсорбція; q – питома адсорбція в момент часу; t – тривалість адсорбції.

Відома лінеаризована форма цього рівняння, в якій приймається, що питома адсорбція в початковий момент часу дорівнює нулю:

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e}.$$

Лінеаризований графік будується в координатах t/q та t (не наводяться).

Розраховані константи швидкості для FeOOH змінюються у ряді $k_{(\text{без сторонніх домішок})}$

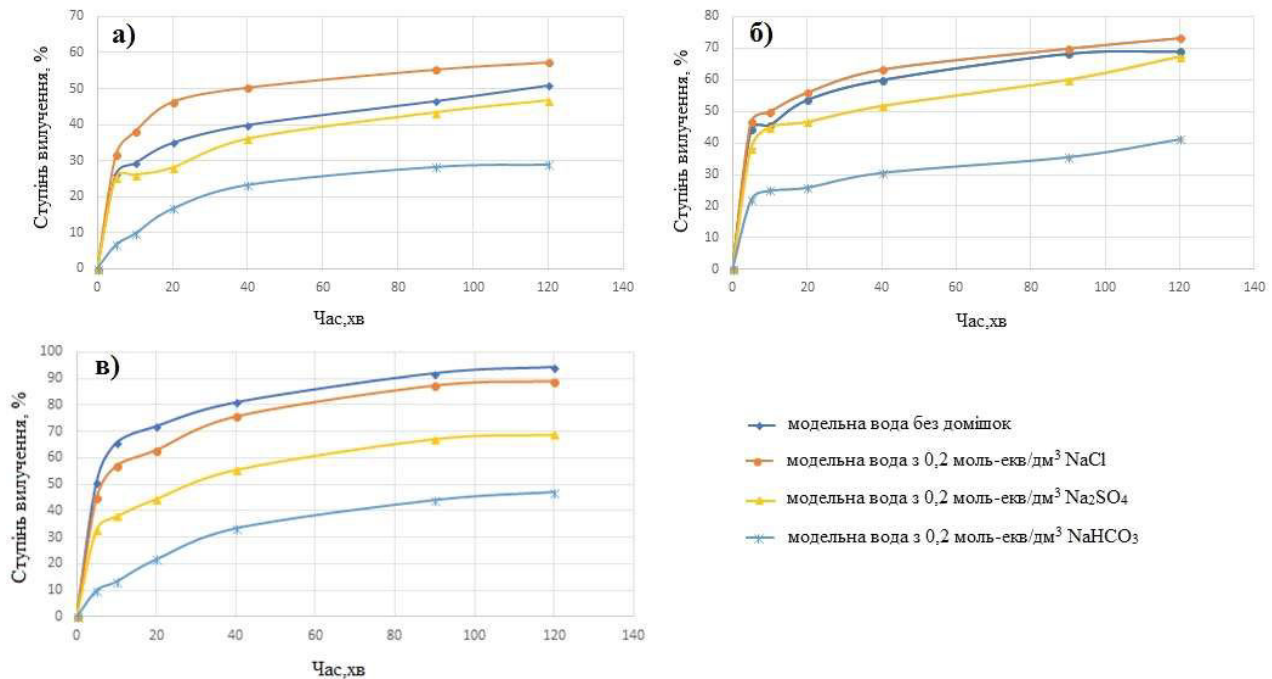


Рис. 2. Вплив аніонів на адсорбцію As(V) із модельних розчинів: а – гематит; б – ферригідрит; в – гетит

$k_{\text{NaCl}} > k_{\text{Na}_2\text{SO}_4} > k_{\text{NaHCO}_3}$, що відповідає розташуванню кривих на графіку. Для гідроксиду ($k_{\text{NaCl}} > k_{\text{(без сторонніх домішок)}} > k_{\text{Na}_2\text{SO}_4} > k_{\text{NaHCO}_3}$) та оксиду ($k_{\text{NaCl}} \approx k_{\text{(без сторонніх домішок)}} > k_{\text{Na}_2\text{SO}_4} > k_{\text{NaHCO}_3}$) ряди констант швидкості теж загалом відповідають розташуванню кривих на графіку.

Спостерігається схожість впливу сторонніх аніонів у випадку сорбентів $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та $\text{Fe}(\text{OH})_3$, що може бути пояснено схожістю методів синтезу цих сорбентів.

Можливим поясненням позитивного впливу хлорид-іонів є сольватаційні процеси. Загально відомо, що у випадку коагуляції, додавання електроліту (зазвичай NaCl) до розчину ферумвмісного коагулянту, значною мірою інтенсифікує процес очищення. Оскільки сорбенти $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та $\text{Fe}(\text{OH})_3$ близькі за своєю хімічною будовою до утвореного в процесі коагуляції ферум(III) гідроксиду, то можливим є перебіг подібних сольватаційних процесів. Ймовірно є участь Cl^- у іонообмінних процесах, тобто відбувається заміна OH^- на Cl^- , в результаті чого відбувається відтягування електронної густини та інші OH -групи підвищують свою реакційну здатність внаслідок послаблення зв'язків.

Негативний вплив сульфат аніона може бути пояснено двозарядністю та більшими розмірами цього аніона, тобто один іон може блокувати підхід арсенатів до двох груп OH .

Можливою причиною негативної дії гідро-

карбонат-іонів може виступати їх часткове перетворення в карбонат-іони, які теж є двозарядними та більші за розмірами, ніж хлорид-іони.

На рис. 3 наведено вплив сторонніх катіонів на ефективність адсорбції.

Порівнюючи вплив іонів кальцію та натрію, можна побачити схожу тенденцію у випадку сорбентів $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та FeOOH . Вірогідно, що іони кальцію на початковому етапі демонструють менш негативний вплив на ступінь вилучення, ніж іони натрію. Це може пояснюватись можливим утворенням малорозчинного кальцій арсенату. Але в подальшому (після 30 хв сорбції) ця закономірність змінюється і іони кальцію демонструють більш негативний вплив, порівняно з іонами натрію. Погіршення може бути результатом розчинення утвореного кальцій арсенату, внаслідок зменшення концентрації арсенат-іонів в розчині через сорбцію. Згідно з розрахунковими даними, ферум(III) арсенат є значно менш розчинним, ніж кальцій арсенат [3]. Тому для підтримання рівноваги відбувається розчинення саме кальцій арсенату. Візуальний механізм цього процесу наведено на рис. 4. Іншим поясненням є ймовірне блокування поверхні зерна сорбенту утвореним кальцій арсенатом (рис. 5).

У випадку $\text{Fe}(\text{OH})_3$ іони кальцію збільшують ступінь вилучення приблизно на 12% відносно іонів натрію, що можливо пов'язано з утво-

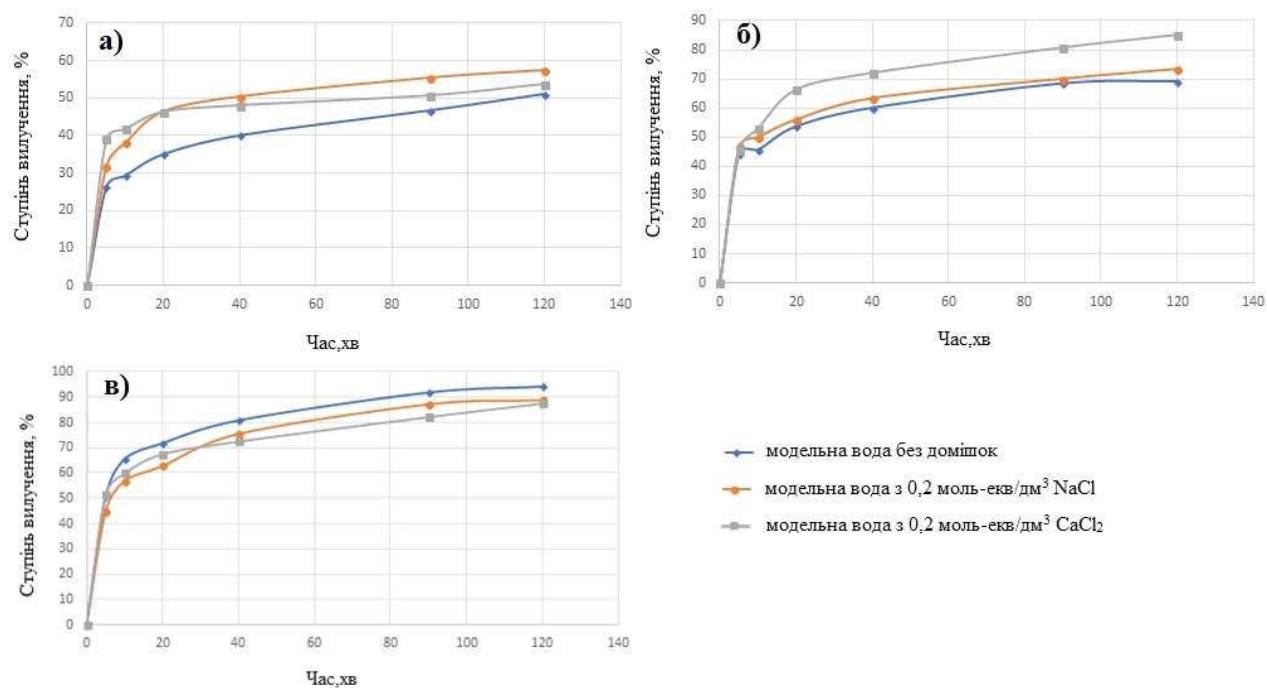


Рис. 3. Вплив катіонів на перебіг адсорбції As(V) із модельних розчинів: а – гематит; б – ферригідрит; в – гетит

ренням малорозчинного кальцій арсенату.

На рис. 4 перша стадія ілюструє початок процесу, коли хімічні реакції ще не відбуваються. Друга стадія – це хемосорбція арсенату на поверхні ферумвмісного адсорбенту з утворенням практично нерозчинних ферум(III) арсенатів, утворення погано розчинного кальцій арсенату. Третя стадія – розчинення утвореного кальцій арсенату з вивільненням арсенат-іонів. Четверта стадія – хемосорбція вивільнених з кальцій арсенату арсенат-іонів на поверхні адсорбенту з утворенням ферум(III) арсенату.

Рис. 5 демонструє інше можливе пояснення впливу кальцій-іонів на адсорбцію.

На рис. 5 перша стадія – це початок процесу, коли хімічні реакції ще не відбуваються. Друга стадія – хемосорбція арсенату на поверхні ферумвмісного адсорбенту з утворенням практично нерозчинних ферум(III) арсенатів, утворення погано розчинного кальцій арсенату. Третя стадія – блокування реакційної поверхні адсорбенту внаслідок осадження утвореного кальцій арсенату на частинці сорбенту.

Також було досліджено вплив рН на ад-

сорбцію арсенату для ферумвмісних сорбентів за умови наявності у модельній воді різних домішок, в даному випадку – NaCl, Na₂SO₄, NaHCO₃. Оскільки у випадку всіх сорбентів (гематит, ферригідрит та гетит) спостерігаються схожі закономірності, то доцільно навести графік тільки для найефективнішого сорбенту – ферум(III) оксигідроксиду (таблиця).

З таблиці видно, що при підвищенні рН у випадку модельної води з NaCl ступінь сорбції As(V) з водного середовища збільшується, а саме збільшення рН від 6 до 8 покращує сорбцію на 3%, але ця незначна відмінність може частково пояснюватися похибкою експерименту. У випадку модельної води з Na₂SO₄, рН зовсім не впливає на сорбцію As(V) з водного середовища. Тобто хлориди та сульфати чинять стабільний вплив на адсорбцію арсенатів в діапазоні рН 6–8.

В свою чергу, ефективність адсорбції As(V) у присутності NaHCO₃ значною мірою залежить від рН, а саме: зі зменшенням рН збільшується ступінь вилучення, що може бути пояснено вуглекислотною рівновагою. За рН 4,4–8,6 у воді в

Вплив рН на адсорбцію арсенату на FeOOH

Параметр	Хлориди			Сульфати			Гідрокарбонати		
	6,0	7,0	8,0	6,0	7,0	8,0	6,0	7,0	8,0
рН вихідної води	6,1	6,5	6,8	6,0	6,4	6,7	6,9	7,4	8,3
Ступінь видалення As(V), %	74	76	77	56	56	56	41	19	10

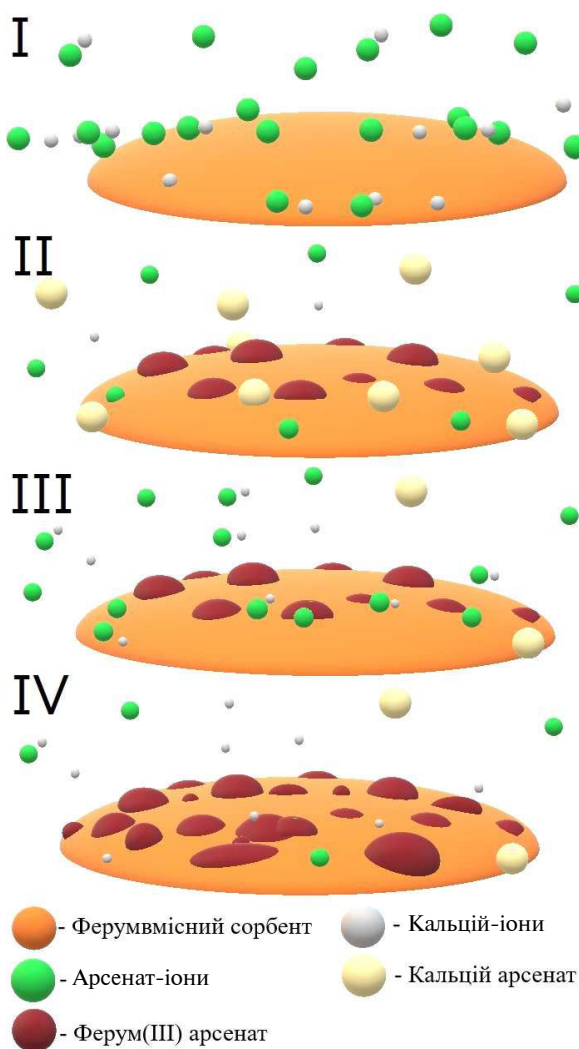


Рис. 4. Візуальне зображення механізму впливу Ca^{2+} на адсорбцію арсенату на ферумвмісному сорбенті (розчинення кальцій арсенату)

рівноважному стані знаходяться вільна карбонатна кислота і гідрокарбонати. Тобто, при переході від рН 8 до 6 у водному розчині зменшується вміст гідрокарбонат-іонів і зростає вміст вільної карбонатної кислоти, яка, в свою чергу, може покинути сферу перебігу процесу (у вигляді CO_2) і не перешкоджає адсорбції. При підвищенні рН в системі з'являються карбонат-іони, які чинять більш негативний вплив на процес адсорбції арсенатів, ніж однозарядні гідрокарбонат-іони.

Також вплив природи аніонів на ефективність адсорбції As(V) частково можна пояснити різною іонною силою розчинів різних аніонів, оскільки іонна сила впливає на константи дисоціації поверхневих OH -груп оксидів та

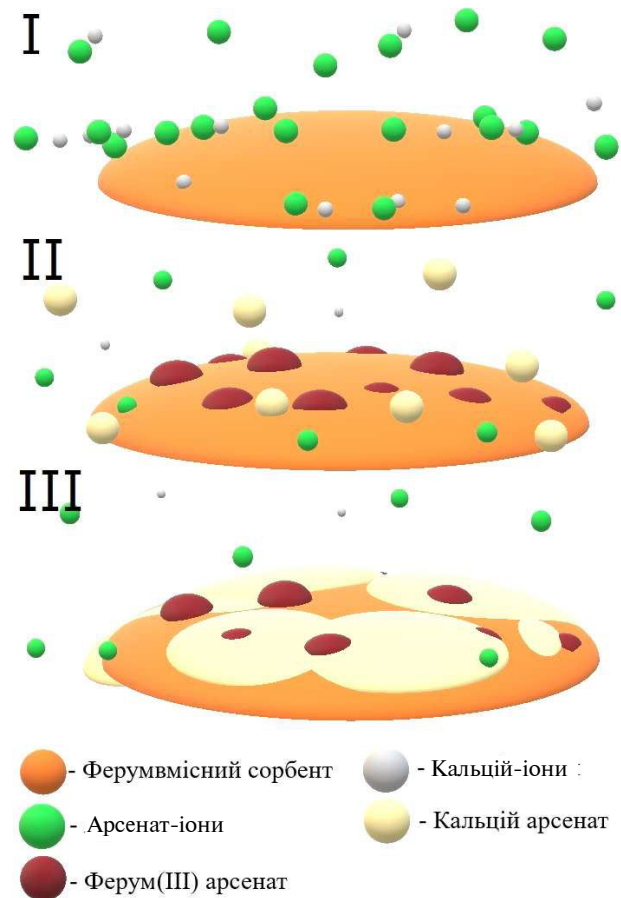


Рис. 5. Візуальне зображення механізму впливу Ca^{2+} на адсорбцію арсенату на ферумвмісному сорбенті (блокування поверхні сорбенту)

гідроксидів. Але проведення дослідження впливу природи сторонніх аніонів на адсорбцію арсенату за умов надлишку фонового електроліту не є доцільним, оскільки висока концентрація електроліту пригнічуватиме адсорбцію арсенату, цим нівелюючи вплив природи домішок на ефективність адсорбції.

Висновки

Спостерігається схожість впливу сторонніх аніонів у випадку сорбентів $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та Fe(OH)_3 , що може бути пояснено аналогією методів синтезу цих сорбентів.

Вплив хлоридів є неоднозначним і у випадку ферум(III) оксиду та гідроксиду відбувається підвищення ефективності адсорбції арсенату. Можливим поясненням позитивного впливу хлорид-іонів є участь Cl^- у іонообмінних процесах, тобто за рахунок заміни OH^- на Cl^- , в результаті чого відбувається відтягування електронної густини та інші OH -групи підвищують

свою реакційну здатність внаслідок послаблення зв'язків.

Сульфати та гідрокарбонати суттєво погіршують видалення арсенату для всіх досліджених ферумвмісних сорбентів. Негативний вплив сульфат аніону може бути пояснено двозарядністю та більшими розмірами цього аніона, тобто один іон може блокувати підхід арсенатів до двох груп OH^- . Можливою причиною негативної дії гідрокарбонат-іонів є їх часткове перетворення в карбонат-іони, які теж є двозарядними та більшими за розмірами, ніж хлорид-іони.

В діапазоні рН модельної води від 6 до 8 вплив хлоридів та сульфатів практично не змінюється, тоді як зі зростанням рН присутність гідрокарбонатів значно погіршує процес. З цього можна зробити висновок, що високі концентрації сульфатів та гідрокарбонатів є небажаними в воді, що очищається від сполук Арсену за допомогою ферумвмісних адсорбентів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Літинська М.І., Астрелін І.М., Толстопалова Н.М. Забруднення природних вод арсеновмісними сполуками: причини та перспективні способи вирішення проблеми // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2016. – № 1. – С.13-22.
2. Сравнительная оценка сорбционных свойств промышленных и экспериментальных гибридных материалов по отношению к примесям As(III) и As(V) в воде / Малецкий З.В., Митченко Т.Е., Макарова Н.В. и др. // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2012. – № 4. – С.21-30.
3. Litynska M., Tolstopalova N., Astrelin I. Neutralization of arsenic pollutants, contained in natural waters: The theoretical analysis of solubility of some arsenates and optimization of the processes // Journal of Water and Environmental Nanotechnology. – 2017. – Vol.2. – No. 21. – P.1-8.
4. Ning R.Y. Arsenic removal by reverse osmosis // Desalination. – 2002. – Vol.143. – No. 3. – P.237-241.
5. Панаруга П.С. Мікроелементи в питних водах Рахів-Тисинської тектонічної зони та їхній вплив на здоров'я населення // Геохімія та рудоутворення. – 2012. – № 31-32. – С.159-163.
6. Removal of arsenic from water streams: an overview of available techniques / Vaklavikova M., Gallios G. P., Hredzak S., Jakabsky S. // Clean Technologies and Environmental Policy – 2008. – Vol.10. – P.89-95.
7. Garrido-Hoyos S., Romero-Velazquez L. Synthesis of minerals with iron oxide and hydroxide contents as a sorption medium to remove arsenic from water for human consumption // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – Vol.13. – No. 1. – Article No. 69.
8. Shadbahr J., Husain T. Affordable and efficient adsorbent for arsenic removal from rural water supply systems in Newfoundland // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol.660. – P.158-168.
9. Powder iron-containing adsorbents for arsenic removal: influence of heating / Litynska M., Antoniuk R., Tolstopalova N., Astrelin I. // Process Engineering Journal. – 2017. – Vol.1. – No. 2. – P.68-72.
10. Ferric oxyhydroxide as fouling prevention reagent for low-pressure membranes / Litynska M., Antoniuk R., Tolstopalova N., Astrelin I. // Journal of Ecological Engineering. – 2019. – Vol.20. – No. 3. – P.77-84.

Надійшла до редакції 22.01.2019

INFLUENCE OF FOREIGN IONS ON THE ADSORPTION OF ARSENATE ON IRON(III) OXIDES AND HYDROXIDES

M. Litynska*, N. Tolstopalova, I. Astrelin, N. Petrus
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

* e-mail: m.litynska-2017@kpi.ua

High arsenic content is typical of natural waters of many countries, including Ukraine. Concentration of arsenic in drinking water, which is higher than 10 mg/L, causes a lot of undesirable consequences (hyperkeratosis, cancer, different diseases). It is necessary to develop new methods of arsenic removal and improve the existing ones. Iron-containing adsorbents are ones of the most usable for water treatment in case of pollution by arsenic. Both natural water and wastewaters have complicated mineral composition. That is why the study of influence of other ions is a topical issue. The paper reports the influence of anions (chlorides, sulfates and hydrocarbonates), cations (sodium and calcium) and pH on the arsenate adsorption on the synthesized goethite, hematite and ferrihydrite. The influence of chlorides is ambiguous and an increase of arsenate adsorption efficiency occurs in case of iron (III) oxide and hydroxide. Sulfates and hydrocarbonates significantly impede removal of arsenate for all investigated iron-containing sorbents. The effect of chlorides and sulfates does not practically change in the pH range of model water of 6 to 8, while the presence of hydrocarbonates dramatically deteriorates the process with increasing pH. One can conclude from these data that high concentrations of sulfates and hydrocarbonates are undesirable in waters which are purified from arsenic compounds by iron-containing adsorbents.

Keywords: arsenates; chlorides; sulfates; hydrocarbonates; iron(III) oxyhydroxide; goethite; iron(III) oxide.

REFERENCES

1. Litynska M.I., Astrelin I.M., Tolstopalova N.M. Zabrudnennya pryrodnykh vod arsenovmisnymy spolukamy: prychny ta perspektyvni sposoby vyrishennya problemy [Pollution of natural waters by arsenic compounds: causes and perspective solutions of the problem]. *Voda i Vodoochysni Tekhnologii. Naukovo-Tekhnichni Visti*, 2016, no. 1, pp. 13-22. (in Ukrainian).
2. Maletskyi Z.V., Mytchenko T.Ye., Makarova N.V., Shevchuk Ye.A., Kolomiets Ye.A. Sravnytel'naya otsenka sorbtsyonnykh svoistv promyshlennykh y eksperymental'nykh gibridnykh materialov po otnosheniyu k prymesiya As(III) i As(V) v vode [A comparative assessment of the sorption properties of industrial and experimental hybrid materials with respect to impurities of As(III) and As(V) in water]. *Voda i Vodoochysni Tekhnologii. Naukovo-Tekhnichni Visti*, 2012, no. 4, pp. 21-30. (in Russian).
3. Litynska M., Tolstopalova N., Astrelin I. Neutralization of arsenic pollutants, contained in natural waters: the theoretical analysis of solubility of some arsenates and optimization of the processes. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 2017, vol. 2, no. 21, pp. 1-8.
4. Ning R.Y. Arsenic removal by reverse osmosis. *Desalination*, 2002, vol. 143, pp. 237-241.
5. Paparyga P.S. Mikroelementy v pytnykh vodakh Rakhiv-Tysyn'skoi' tektonichnoi' zony ta i'khnii vplyv na zdorov'ya naselenn'ya [Microelements in the drinking waters of the Rakhiv-Tysa tectonic zone and their impact on the health of the population]. *Geokhimiya ta Rudovivorennya*, 2012, no. 31-32, pp. 159-163. (in Ukrainian).
6. Vaklavikova M., Gallios G. P., Hredzak S., Jakabsky S. Removal of arsenic from water streams: an overview of available techniques. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2008, vol. 10, pp. 89-95.
7. Garrido-Hoyos S., Romero-Velazquez L. Synthesis of minerals with iron oxide and hydroxide contents as a sorption medium to remove arsenic from water for human consumption. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, vol. 13, no.1, article no. 69.
8. Shadbahr J., Husain T. Affordable and efficient adsorbent for arsenic removal from rural water supply systems in Newfoundland. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 660, pp. 158-168.
9. Litynska M., Antoniuk R., Tolstopalova N., Astrelin I. Powder iron-containing adsorbents for arsenic removal: influence of heating. *Process Engineering Journal*, 2017, vol. 1, no. 2, pp. 68-72.
10. Litynska M., Antoniuk R., Tolstopalova N., Astrelin I. Ferric oxyhydroxide as fouling prevention reagent for low-pressure membranes. *Journal of Ecological Engineering*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 77-84.