

УДК 628.33

## АНАЛІЗ СОРБЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ПРИРОДНИХ СОРБЕНТІВ ПО ВІДНОШЕННЮ ДО ВОДНИХ РОЗЧИНІВ СПОЛУК ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

О. М. Хоменко, О. В. Єгорова, О. О. Мислюк

Черкаський державний технологічний університет,  
бул. Шевченка, 460, 18006, Черкаси, Україна, o.khomenko@chdtu.edu.ua  
<https://orcid.org/0000-0001-9329-0577>

Основними передумовами виникнення в країні кризового екологічного стану, пов'язаного із забрудненням поверхневих вод, є нераціональне використання водних ресурсів із порушенням екологічних вимог, скидання у водні об'єкти неочищених та недостатньо очищених промислових та комунальних стічних вод, а також надходження з поверхневим стоком забруднюючих речовин із сільськогосподарських угідь. Весь комплекс розглянутих факторів є причиною виснаження і забруднення поверхневих вод України, зниження їх самоочисної спроможності, деградації, збідніння та розпаду водних екосистем.

Перевищення вмісту іонів важких металів в поверхневих водах негативно впливає на довкілля, викликає гострі та хронічні захворювання населення, що стало останнім часом поширеним негативним фактором для навколишнього природного середовища України. Потрапляння таких поллютантів в поверхневі води практично повністю обумовлюється антропогенною господарською діяльністю і значну частку цих забруднень складають стоки стічних вод підприємств стратегічних для України промислових напрямків: хімічного, целюлозно-паперового, шкіряно-хутрового, а особливо – чорної та кольорової металургії.

Серед різних методів усунення іонів важких металів з водних середовищ, сорбційні видаються одними із найбільш ефективних, переважно завдяки тому, що за порівняно невеликих затрат вдається досягти високого ступеня очищення. Поряд із адсорбентами, які традиційно застосовуються у цих процесах, в останній час проводиться ряд досліджень та практичних впроваджень із використанням як адсорбентів природних дисперсних мінералів.

Метою даної роботи є дослідження сорбційної здатності та ефективності застосування природного та модифікованого сорбенту – бентонітової глини – у процесах очищення водних розчинів, котрі містять в своєму складі іон важких металів у вигляді розчинених сполук та обґрунтування перспектив їх використання.

Запропоновано методику модифікації бентонітової глини з метою підвищення її адсорбційної здатності до іонів важких металів трьома способами: фізичним (термічним), хімічним (обробка розчином ферум (III) хлоридом) та комбінованим (термообробка вихідного сорбенту із подальшою обробкою розчином ферум (III) хлоридом).

Експериментально доведено, що модифікований природний сорбент шляхом термічної та хімічної обробки характеризується високою поглинальною здатністю до іонів важких металів із водних розчинів, зокрема іонів хрому (VI), купрум (II) та алюмінію (III), ступінь очистки яких знаходиться в межах від 5 % до 83%. Найвищий ступінь поглинання, 83%, спостерігається для комбінованого способу модифікації бентонітової глини, що доводить ефективність використання екологічно безпечних природних сорбентів у процесах очищення стічних вод від іонів важких металів. Наведено переваги сорбційних методів очистки стічних вод з можливістю вилучення забруднюючих речовин різного походження та будь-якої концентрації.

**Ключові слова:** стічні води; бентонітові глини; сорбент; адсорбція; модифікація

### 1. ВСТУП

Забруднення навколишнього природного середовища важкими металами – один з найбільш небезпечних видів антропогенного впливу на сьогоdnішній день. Розгалужені транспортні мережі, безліч житлових комплексів і збільшення транспорту на дорогах (а також збільшення ав-

тозаправних комплексів) – все це фактори, що суттєво збільшують ризик зростання концентрацій важких металів у компонентах навколишнього середовища. Основними ж сферами утворення великої кількості забруднюючих агентів залишаються гальванічні виробництва, машинобудівна та металообробна галузі. Виробничі цикли

даних промислових підприємств характеризуються значним споживанням чистої води і, відповідно, утворенням великої кількості стоків, що містять іони важких і кольорових металів (купруму, цинку, феруму, кадмію, хрому, нікелю тощо).

Проблема видалення важких металів зі стічних вод є досить актуальною. Слабко очищені стічні води потрапляють у природні водойми, де сполуки важких металів відкладаються і накопичуються у воді, донних відкладеннях і стають джерелом вторинного забруднення. Важкі метали та їхні сполуки частково випадають в осад у вигляді карбонатів, сульфатів, частково адсорбуються на мінеральних і органічних осадах. Внаслідок чого вміст з'єднань важких металів у відкладеннях постійно збільшується, і коли адсорбційна здатність осадів вичерпується, важкі метали надходять у воду, що й призводить до екологічної кризи.

Серед різних методів усунення сполук іонів важких металів з водних середовищ, саме сорбційні видаються одними із найбільш ефективних, переважно завдяки тому, що за порівняно невеликих затрат вдається досягти високого ступеня очищення.

Поряд із адсорбентами, які традиційно застосовуються у цих процесах (активоване вугілля, силікагелі, штучні цеоліти) в останній час проводиться ряд досліджень та практичних впроваджень із використанням як адсорбентів природних дисперсних мінералів [1-5]. Завдяки пористій структурі та високорозвиненій поверхні такі мінеральні сорбенти, які проявляють високі адсорбційні, каталітичні та іонообмінні властивості, здатні селективно вилучати із водних розчинів різні класи речовин. Економічна доцільність використання цих сорбентів у різних технологічних процесах зумовлюється також існуванням ефективних методів регулювання їхньої геометричної структури та хімічної природи поверхні, існуванням в Україні великих промислових родовищ та невисокою вартістю мінералів із адсорбційними властивостями [6]. Виходячи із цього, дослідження процесів адсорбційного очищення водних середовищ із використанням природних адсорбційних мінералів є завданням важливим та актуальним.

Метою даної роботи є дослідження сорбційної здатності та ефективності застосування природного та модифікованого сорбенту – бентонітової глини – у процесах очищення водних розчинів, котрі містять в своєму складі іон важких металів у вигляді розчинених сполук та обґрунтування перспектив їх використання.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методологічну основу роботи складає аналіз існуючих наукових публікацій, а також на матеріалах власних досліджень. Для експериментального визначення іонів хрому (VI), іонів купруму (II) та іонів алюмінію (III) в стічних водах використовували фотоколориметричний метод; активацію природного сорбенту проводили термічними та хімічними методами; метод теоретичного аналізу процесу сорбції та аналітична обробка даних за допомогою ПК.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відомо, що ефективним сорбентом для очистки стічних вод від іонів важких металів є синтетичні іонні смоли (катионіти), що володіють високою обмінною сорбційною ємністю. Однак, альтернативою можуть стати природні матеріали, що володіють меншою, в порівнянні з катионітами, обмінною ємністю, проте є значно дешевшими. До переваг природних сорбентів можна віднести їх доступність, широку географічну розповсюдженість в Україні, а також можливість їх регенерації або утилізації шляхом застосування в технологіях отримання інших продуктів.

Бентонітова глина є об'ємним наноструктурним матеріалом з великим набором змінних, модифікація яких веде до зміни первинних та набуття нових властивостей речовини, котрі необхідні для того чи іншого виробництва.

Бентонітові глини відносять до корисних копалін, що є тонкодисперсними високопластичними гірськими породами, які складаються в основному із смектинових мінералів. За походженням бентоніти виникають в результаті зміни вулканічної породи або є аутигенними мінералами, тобто мінералами осадових порід, що утворилися в процесі седиментації або подальшого перетворення осаду на місці його накопичення [7]. Найбільш важливим мінеральним компонентом бентонітових глин є смектит (глинистий мінерал). Тому основна увага приділяється мінералогічному аналізу смектиту. Смектитові мінерали діляться на дві підгрупи: діоктаедричний і триоктаедричний.

В діоктаедричних смектитах катіонами заповнені лише 2/3 всіх октаедричних пустот, а в центрі октаєдрів переважно знаходяться катіони  $Al^{3+}$ . У триоктаедричних смектитах всі октаедричні позиції заповнені катіонами, причому в центрі октаєдрів переважно знаходяться катіони  $Mg^{2+}$  [8]. До діоктаедричних смектитів відносяться:

монтморилоніт  $M_{x/n}^{n+} [Al_{4-x} Mg_x] (Si_8) O_{20} (OH)_4$ ,  
 бейделіт  $M_{x/n}^{n+} [Al_{4-x}] (Si_{8-x} Al_x) O_{20} (OH)_4$ ,  
 гекторит  $M_{x/n}^{n+} [Mg_{6-x} Li_x] (Si_8) O_{20} (OH, F)_4$ ,  
 сапоніт  $M_{x/n}^{n+} [Mg_6] (Si_{8-x} Al_x) O_{20} (OH)_4$ .

Кристалічна ґратка всіх смектитів має шарувату структуру (рисунок 1). В елементарну комірку, звичайно, входять 3 шари, які утворюють пакет. Верхній і нижній шари пакету складаються із тетраедрів Al та SiO<sub>4</sub>. Між тетраедричними шарами розміщується шар, який складається із октаедрів Al і Fe. Такий трьохшаровий пакет має негативний заряд, який обумовлюється заміщенням тривалентних елементів (Al і Fe) в октаедричному шарі на двовалентні (Mg, Fe) або чотиривалентного елемента Si на тривалентний Al в тетраедричному шарі.

Завдяки негативному заряду на поверхні пакету розміщуються позитивно заряджені

катіони. Це головним чином Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> і Fe<sup>3+</sup>. Це і є джерелом обмінної здатності смектинових глинистих мінералів [8].

Внаслідок взаємодії з водою цих катіонів можуть утворюватись гідратні оболонки, і агрегат пакетів при цьому набухає. Характерно, що об'єм гідратної оболонки для різних катіонів відрізняється. Найбільшу гідрофільну здатність мають йони лужних металічних елементів і в першу чергу натрій. Залежно від складу обмінного комплексу розрізняють лужні (натрієві і кальцій-натрієві) і лужноземельні (кальцієві, магній-кальцієві, кальцій - магнієві) бентоніти. Ця різниця зумовлена особливостями кристалічної будови смектиту, завдяки яким бентоніти володіють багатьма специфічними властивостями, зокрема іонообмінною здатністю. Найбільшою іонообмінною здатністю володіють натрієві бентоніти. Особливістю кальцієвих бентонітів є їх низький ступінь набрякання, що дозволяє їх використовувати в якості фільтруючого матеріалу при очищенні водних розчинів [9].

Також, важливою в практичному відношенні особливістю мінералів групи монтморилоніту є їх властивість набрякати в присутності води, а при нагріванні поступово віддавати адсорбовану воду [10].

Родовище бентонітових глин на Черкащині розміщено на території Лисянського району, а запаси глини продуктивної товщі було оцінено в 22000 млн.т, а її потужність – в 0,5-43 м. За своїми фізичними властивостями це густі, в'язкі, на дотик масні породи різних кольорів – від білого до чорного. У таблиці 1 подано усереднений хімічний склад та основні фізико-хімічні властивості базових мінералів бентонітових глин Черкаського родовища.

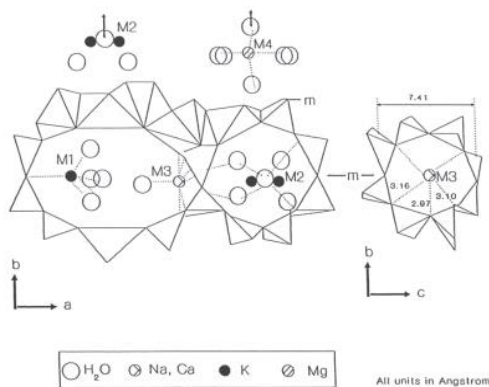


Рис. 1 – Кристалічна структура кліноптилоліту [2]  
 Fig.1 – Crystal structure of clinoptilolite

Таблиця 1 – Хімічний склад (% мас.) і поверхневі властивості основних мінералів бентонітових глин [2,8,11]  
 Table 1 – Chemical composition and surface properties of basic minerals of bentonite clays

Компоненти і властивості	Палигорськіт	Глауконіт	Гідрослюда	Сапоніт	Монтморилоніт
SiO <sub>2</sub>	52,9	48,8	54,1	46,3	51,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,5	8,5	13,4	12,5	18,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,9	18,9	8,3	17,0	7,2
TiO <sub>2</sub>	-	0,7	0,5	1,9	0,5
MgO	7,2	3,8	8,5	14,8	1,5
CaO	0,3	2,0	0,8	2,4	1,7
Na <sub>2</sub> O	0,4	0,3	0,4	3,6	0,1
K <sub>2</sub> O	0,4	6,1	6,3	0,7	0,1
S*, м <sup>2</sup> /г	302	120	170	106	410
d, г/см <sup>3</sup>	2,7	3,1	3,2	2,8	2,8
A, мг-екв/100 г	23,5	29,0	27,2	57,0	67,3

*Методика експерименту.*

У якості об'єкта дослідження були обрані зразки водних розчинів важких металів, що містили один із агентів-забруднювачів, зокрема іони хрому (водний розчин калій дихромату), алюмінію (водний розчин хлориду алюмінію) та купрум (водний розчин сульфату купрум). Водні розчини, із концентраціями 1 мг/дм<sup>3</sup>, готували шляхом розчинення розрахункової кількості відповідних солей у дистильованій воді.

Дослідження сорбційної здатності бентонітової глини проводили в динамічному режимі. Співвідношення глини і робочого розчину становило: 1 г глини на 50 мл розчину. Тривалість сорбції від 5 хвилин до 24 годин. Після завершення сорбції суспензію фільтрували за допомогою фільтра «синя стрічка» та аналізували отриманий фільтрат на вміст залишкової концентрації агентів-забруднювачів.

Аналіз залишкової концентрації визначали за допомогою фотоколориметричного методу на приладі КФК-2 за стандартними методиками. При аналізі зразків фотометричні дослідження проводилися в трьох паралелях з метою зменшення похибки визначення.

В основу методу визначення вмісту іонів купруму (II) у воді покладено утворення забарвленого комплексу сполук купруму з диетилдитіокарбаматом натрію у лужному середовищі синьо-фіолетового кольору.

Метод визначення хрому (VI) заснований на вимірюванні світлопоглинання в діапазоні довжин хвиль від 540 до 550 нм червоно-фіолетової комплексної сполуки, що утворюється в результаті реакції 1,5-дифенілкарбазиду з біхромат-іонами проби аналізованої води в кислому середовищі та подальшим визначення хрому (VI) за значенням оптичної щільності розчину.

В основу методу визначення вмісту іонів алюмінію (III) у воді покладено утворення помаранчево-червоного комплексу алюмінію з алюміноном у кислому середовищі.

Ефективність очищення стічної води визначали за формулою

$$\varphi = \frac{C_{II} - C_K}{C_n} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $C_{II}$  – початкова концентрація іонів хрому (III) у модельному розчині, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_K$  – концентрація іонів хрому (III) після очищення, мг/дм<sup>3</sup>.

Дослідження сорбційної здатності неактивованої бентонітової глини до іонів важких металів показало, що природний сорбент має низький ступінь адсорбції та ефективність очищення, котрий знаходиться в межах 16,93-42%, що вказує на те, що бентонітова глиня потребує додаткової активації з метою збільшення адсорбційної здатності. Залишкова концентрація іонів-забруднювачів в модельному розчині після очищення у всіх випадках перевищувала допустимі ГДК.

З метою підвищення ефективності сорбційної здатності адсорбенту, бентонітової глини, проведено її модифікацію трьома способами:

1) фізичним (термічним) – термомодифікацію здійснювали шляхом прожарювання у сушильній шафі бентоніту за температури 120 °C протягом 12 год;

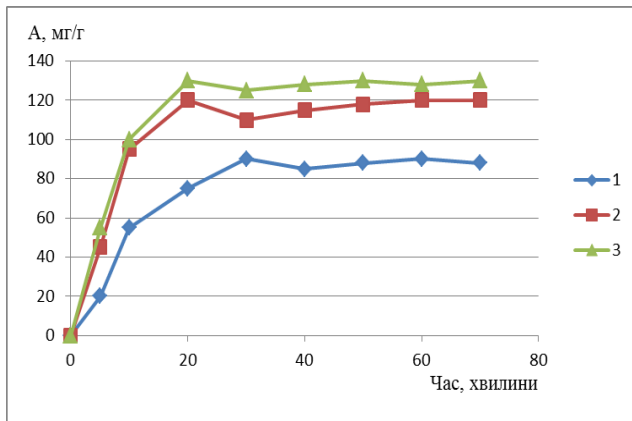
2) хімічним – модифікацію бентонітової глини здійснювали шляхом обробки розчином ферум (III) хлоридом із вмістом FeCl<sub>3</sub> – 60 г/л, рН=2,3. Процес взаємодії глини з розчином ферум (III) хлоридом відбувається з достатньою інтенсивністю вже за кімнатної температури;

3) комбінований – модифікування бентоніту відбувалось шляхом термообробки вихідного сорбенту із подальшою хімічною обробкою розчином ферум (III) хлоридом із вмістом FeCl<sub>3</sub> – 60 г/л, рН=2,3.

Дослідження кінетичних параметрів сорбції іонів важких металів показало, що встановлення рівноваги в системі сорбат-розчин для зразків бентонітової глини до модифікації та після термічної обробки становить 45 хвилин. Швидкість сорбції є максимальною в перші 15 хвилин процесу. На рисунку 2 наведено кінетичні криві сорбції іонів важких металів досліджуваних зразків в перші 70 хвилин. Дані по сорбції через добу не відрізнялись від тих даних, що отримані через 70 хвилин процесу.

Швидкість сорбції іонів важких металів має практичне значення, оскільки визначає час, що витрачається на максимально можливе поглинання іону з розчину.

Термічна обробка природних бентонітів сприяла збільшенню сорбційної здатності по відношенню до іонів Cu<sup>2+</sup> та Al<sup>3+</sup>, але незначний для іонів Cr<sup>6+</sup> (рисунок 3). З літературних джерел відомо, що підвищення сорбційної здатності обумовлюється видаленням фізично зв'язаної вологи та характеризується збільшенням загальної пористості [8].

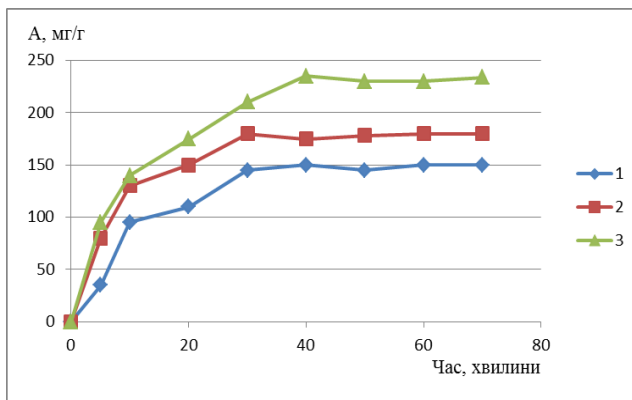


1 – розчин стічних вод, що містить іони хрому (VI);  
2 – розчин стічних вод, що містить іони алюмінію (III);  
3 – розчин стічних вод, що містить іони купруму (II)

1 – wastewater solution containing chromium ions (VI);  
2 – wastewater solution containing aluminum ions (III);  
3 – wastewater solution containing copper ions (II)

**Рис. 2** – Кінетичні криві сорбції іонів важких металів неактивованою бентонітовою глиною

**Fig.2** – Kinetic curves of sorption of heavy metal ions by inactivated bentonite clay



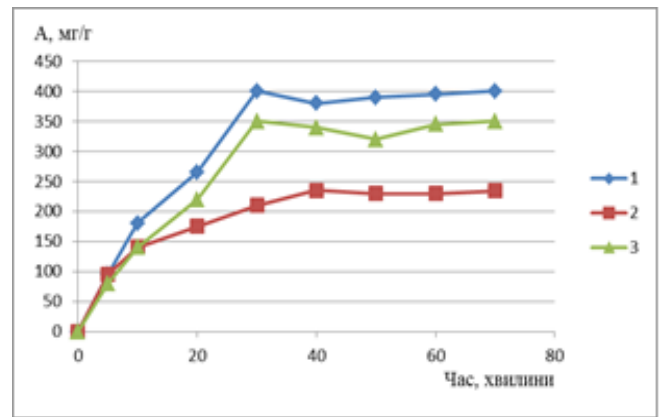
1 – розчин стічних вод, що містить іони хрому (VI);  
2 – розчин стічних вод, що містить іони алюмінію (III);  
3 – розчин стічних вод, що містить іони купруму (II)

1 – wastewater solution containing chromium ions (VI);  
2 – wastewater solution containing aluminum ions (III);  
3 – wastewater solution containing copper ions (II)

**Рис. 3** – Кінетичні криві сорбції іонів важких металів бентонітовою глиною після термічної модифікації

**Fig.3** – Kinetic curves of sorption of heavy metal ions by bentonite clay after thermal modification

Аналіз рисунка 4 показує, що хімічна обробка глини розчином ферум (III) хлоридом призводить до різкого збільшення сорбційної здатності по відношенню до всіх досліджуваних іонів важких металів. Це пояснюється тим, що в даному випадку відбувається руйнування карбонатних включень в глинистих породах у вигляді розчинних хлоридів кальцію (магнію). При взаємодії бентонітової глини із водним розчином ферум (III) хлоридом відбувається нейтралізація



1 – розчин стічних вод, що містить іони хрому (VI);  
2 – розчин стічних вод, що містить іони алюмінію (III);  
3 – розчин стічних вод, що містить іони купруму (II)

1 – wastewater solution containing chromium ions (VI);  
2 – wastewater solution containing aluminum ions (III);  
3 – wastewater solution containing copper ions (II)

**Рис. 4** – Кінетичні криві сорбції іонів важких металів бентонітовою глиною після хімічної модифікації розчином ферум (III) хлоридом

**Fig.4** – Kinetic curves of sorption of heavy metal ions by bentonite clay after chemical modification with a solution of iron (III) chloride

карбонатів кальцію (магнію) внаслідок процесу гідролізу.

Таким чином, у процесі модифікування бентонітової глини ферум (III) хлоридом має місце як хімічна, так і поверхнева взаємодія глинистого мінералу з модифікатором. Після хімічної активації зразків відбувається часткове руйнування решітки монтморилоніту, збільшується питома поверхня, загальний обсяг і радіус пор адсорбенту.

Аналогічну картину можна спостерігати при сорбції іонів важких металів бентонітовою глиною, що модифікована комбінованим методом. Дослідження кінетичних параметрів сорбції іонів важких металів показало, що встановлення рівноваги в системі сорбат-розчин для зразків бентонітової глини комбінованим методом модифікації складає 25 хвилин. Швидкість сорбції є максимальною в перші 5-10 хвилин процесу.

Серія експериментальних досліджень з визначення ступеня очистки стічних вод, результати якої представлені в таблиці 2 показала, що глина до модифікації має низьку поглинальну здатність до всіх іонів-забруднювачів і знаходиться в межах 5-25%. Термічна модифікація дозволяє підвищити даний показник у 1,5 рази, зокрема для іонів хрому (VI), після термічної модифікації ступінь поглинання становить 25,0%, для іонів купруму та алюмінію 15,0 % та 30,0 % відповідно. На нашу думку, це пов'язано із видаленням не лише фізичної зв'язаної вологи,

**Таблиця 2** – Результати досліджень модельних зразків стічної води до та після очистки природними та модифікованими бентонітовими глинами

**Table 2** – The results of studies of model samples of wastewater before and after treatment with natural and modified bentonite clays

Показник		До очистки			Після очистки		
		Cr <sup>6+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Cr <sup>6+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
Концентрація іонів-забруднювачів у модельному розчині, мг/дм <sup>3</sup>	глина до модифікації	1,0			0,81	0,95	0,75
	глина після термомодифікації (t=120°C)				0,75	0,85	0,70
	глина після хімічної модифікації FeCl <sub>3</sub>				0,355	0,75	0,42
	глина після комбінованого способу модифікації (FeCl <sub>3</sub> +t°C)				0,17	0,55	0,35
Ступінь очистки, %	глина до модифікації				19,0	5,0	25,0
	глина після термомодифікації (t=120°C)				25,0	15,0	30,0
	глина після хімічної модифікації FeCl <sub>3</sub>				64,5	25,0	58,0
	глина після комбінованого способу модифікації (FeCl <sub>3</sub> +t°C)				83,0	45,0	65,0

а також із розкладом решток органічних речовин, що наявні у порах бентоніту, що призводить до збільшення питомої поверхні сорбенту.

Одержані під час експериментальних досліджень результати свідчать про те, що модифіковані розчином ферум (III) хлоридом бентонітові глини мають високу сорбційну здатність щодо іонів хрому (VI), що становить 64,5%, та меншу до іонів купруму (II) – 58,0%. Найнижчу сорбційну здатність вони виявляють щодо іонів алюмінію, оскільки дані іони знаходяться в структурній решітці самого мінералу, що перешкоджає максимальному поглинанню їх з розчину.

У межах дослідження сорбційних властивостей модифікованої глини комбінованим методом щодо іонів хрому встановлено, що максимальне зниження концентрації спостерігається вже на 5 хвилині процесу очищення і складає близько 83% від вихідної концентрації, що підтверджує ефективність використання бентонітової глини в якості сорбенту для очищення стічних вод від іонів хрому (VI). Аналогічні властивості сорбент проявляє щодо іонів купруму (II), де ступінь поглинання становить 65 %, однак порівняно низький коефіцієнт поглинання залишається для іонів алюмінію (III) – 45%.

Таким чином, модифіковані глинисті сорбенти дозволяють значно збільшити ефективність процесу сорбції іонів Cu<sup>2+</sup> та Cr<sup>6+</sup> та зменшити

витрати сорбентів у порівнянні з природною формою зразків.

#### 4. ВИСНОВКИ

Проведені експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про можливе використання глин Дашуківського родовища в активованій формі для очищення стічних вод від іонів важких металів. Встановлено, що адсорбент проявляє високі сорбційні та ємнісні характеристики: адсорбційна рівновага досягається за 40 хвилин, швидкість сорбції максимальна в перші 10-15 хвилин процесу.

Ефективність адсорбції зростає у випадку модифікації адсорбенту, що варіюється в межах від 35% до 98% в залежності від обраного способу для всіх іонів-забруднювачів. Найбільш оптимальним варіантом активації є застосування комбінованого способу модифікації – термообробка вихідного сорбенту із подальшою обробкою розчином ферум (III) хлоридом. Як свідчать отримані результати експериментальних досліджень, рівновага в системі сорбат-розчин для зразків бентонітової глини комбінованим методом модифікації складає 25 хвилин, швидкість сорбції є максимальною в перші 5-10 хвилин процесу. Ступінь очищення модельного розчину стічної води від іонів купруму (II) та хрому (III) харак-

теризується найвищим результатом, а саме 83,0 % та 65,0 % відповідно, що підтверджує спроможність використання бентонітової глини як природного сорбенту з метою очищення стічної води та покращення її фізико-хімічних та органолептичних показників за рахунок високих адсорбційних, іонообмінних і фільтраційних властивостей.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мальований М. С., Петрушка І. М. Очищення стічних вод природними дисперсними сорбентами: монографія. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. 180 с.
2. Сакалова Г. В., Василінич Т. М. Дослідження ефективності очищення стічних вод від іонів важких металів з використанням природних адсорбентів: монографія. Вінниця: ВДПУ ім. Михайла Коцюбинського, 2019. 92 с.
3. Kovo G. Akpomie, Folasegun A. Dawodu. Potential of a low-cost bentonite for heavy metal abstraction from binary component system. Beni-Suef University. *Journal of Basic and Applied Sciences*. 2015. Vol. 4, issue 1. Pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2015.02.002>.
4. Saravanan D., Gomathi T., Sudha P. N. Sorption studies on heavy metal removal using chitin/bentonite biocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2013. Vol. 53. Pp. 67-71. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.11.005>.
5. Cadmium adsorption on manganese modified bentonite and bentonite-quartz sand blend. International / Tomáš Schütz, Silvia Dolinská et al. *Journal of Mineral Processing*. 2016. Vol. 150. Pp. 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.03.003>.
6. Water Sorption Purification from Ammonium Pollution / Malyovanyi Myroslav, Sakalova Galina, Chornomaz Natalia, Nahurskyu Oleh. *Chemistry and Chemical Technology*. 2013. Vol. 7(3). Pp. 355-358. <https://doi.org/10.23939/chcht07.03.355>.
7. Bergaya F., Theng B. K. G., Lagaly G. Chapter 1. General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science. *Developments in Clay Science, Elsevier*. 2006. Vol. 1. Pp. 1-18. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01001-9](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01001-9)
8. Ик-спектральное исследование структуры и фазового состава бентонитов Украины / Т. Л. Ракитская, Т. А. Киосе, А. М. Джига, С. В. Топоров. *Вісник Одеського національного університету. Хімія*. 2012. 17(1). С.13-19.
9. Brown G., Nadeau P. Crystal Structures of Clay Minerals and Related Phyllosilicates [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1984. Vol. 311(1517). Pp. 221-240
10. Наукові основи безвідходної технології доочищення промислових стічних вод від сумішей іонів важких металів / Е. С. Яновська, І. В. Затовський, М. С. Слободяник. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2008. №5. С. 50–54.
11. Танеева А. В. Анализ сорбционных характеристик сорбентов на основе бентонитов. *Поволжский научный вестник*. 2017. № 3. С. 31-36.

#### REFERENCE

1. Malovanyi, M.S. & Petrushka, I.M. (2012). *Ochyschennia stichnykh vod pryrodnymy dyspersnyy sorbentamy [Wastewater treatment with natural dispersed sorbents]*. Lviv: Publ "Lvivska politehnika". (in Ukr).
2. Sakalova, H.V. & Vasylynych, T.M. (2019). *Doslidzhennia efektyvnosti ochyschennia stichnykh vod vid ioniv vazhkykh metaliv z vykorystanniam pryrodnykh adsorbentiv [Study of the effectiveness of wastewater treatment from heavy metal ions using natural adsorbents]*. Vinnytsia: The Mykhailo Kotsyubynsky VSPU (in Ukr).
3. Kovo, G. Akpomie & Folasegun, A. Dawodu. (2015). Potential of a low-cost bentonite for heavy metal abstraction from binary component system. Beni-Suef University. *Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(1), pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2015.02.002>.
4. Saravanan, D., Gomathi, T. & Sudha, P.N. (2013). Sorption studies on heavy metal removal using chitin/bentonite biocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 53, pp. 67-71. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.11.005>.
5. Tomáš, Schütz et al. (2016). Cadmium adsorption on manganese modified bentonite and bentonite-quartz sand blend. *International Journal of Mineral Processing*, 150, pp. 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.03.003>.
6. Malyovanyi, Myroslav et al. (2013). Water Sorption Purification from Ammonium Pollution. *Chemistry and Chemical Technology*, 7(3), pp. 355-358. <https://doi.org/10.23939/chcht07.03.355>.
7. Bergaya, F., Theng, B.K.G. & Lagaly, G. (2006). Chapter 1. General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science. *Developments in Clay Science, Elsevier*, 1, pp. 1-18. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01001-9](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01001-9)
8. Rakitskaya, T.L. et al. (2012). Ик-спектральное исследование структуры и фазового состава бентонитов Украины [IR-spectral study of the structure and phase composition of bentonites of Ukraine]. *Visnik Odeskoho natsionalnoho universitetu. Khimiia [Journal of Odessa National University. Chemistry]*, 17(1), pp.13-19. (in Ukr).
9. Brown, G. & Nadeau, P. (1984). Crystal Structures of Clay Minerals and Related Phyllosilicates [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 311(1517), pp. 221-240
10. Yanovska E.S. (2008). Naukovi osnovi bezvidkhodnoi tehnologii doochyshchennia promyslovykh stichnykh vod vid sumishei ioniv vazhkykh metaliv. [Scientific bases of waste-free technology of industrial wastewater treatment from mixtures of heavy metal ions]. *Ekolohiia dovkillia ta bezpeka zhyttiediialnosti [Ecology of the environment and safety of life]*, 5, pp. 50-54. (in Ukr).
11. Taneyeva, A.V. (2017). Analiz sorbtsionnykh kharakteristik sorbentov na osnove bentonitov [Analysis of sorption characteristics of sorbents based on bentonites] *Povolzhskiy nauchnyy vestnik [Povolzhsky Scientific Bulletin]*, 3, pp. 31-36. (in Ukr).

## **ANALYSIS OF SORPTION CAPACITY OF NATURAL SORBENTS IN RELATION TO AQUEOUS SOLUTIONS OF HEAVY METAL COMPOUNDS**

**O. M. Khomenko, O. V. Yehorova, O. O. Mysliuk**

*Cherkasy state technological university,  
460, Shevchenko boulevard, 18006, Cherkasy, Ukraine, o.khomenko@chdtu.edu.ua  
<https://orcid.org/0000-0001-9329-0577>*

The main preconditions emergence of an environmental crisis in the country due to surface water pollution include irrational use of water resources in violation of the environmental requirements, discharge of untreated and insufficiently treated industrial and municipal wastewater into water bodies and inflow of polluting substances from agricultural lands as a result of surface water drainage. The whole set of considered factors leads to depletion and pollution of surface water of Ukraine, reduction of their self-cleaning capacity, degradation, impoverishment and collapse of aquatic ecosystems.

Excessive content of heavy metal ions in surface water has a negative impact on the environment, causing acute and chronic diseases. Ingress of such pollutants into surface water is almost entirely due to anthropogenic economic activity. Wastewater from chemical, ferrous and nonferrous metallurgy brings a great amount of such pollutants.

Among various methods used for removing heavy metal ions from aqueous media, sorption methods remain one of the most effective and popular, mainly due to the fact that they ensure a high degree of purification at relatively low costs. Along with the adsorbents traditionally involved in these processes, a number of studies and practical implementations with use of natural dispersed minerals as adsorbents were conducted lately.

The research aims at studying the sorption capacity and efficiency of natural and modified sorbent such as bentonite clay for purification of aqueous solutions containing heavy metal ions in the form of dissolved compounds and justifying its potential application.

It studies the efficiency of wastewater treatment aimed at removing heavy metal ions by the natural clay sorbent of bentonite clays of the Cherkaskyi Deposit (Dashukovskiy deposit).

The paper presents a technique for modification of bentonite clay in order to increase its adsorption capacity for heavy metal ions using the following three methods: physical (thermal), chemical (processing with application of Iron(III) chloride solution) and combined (thermal processing of the original sorbent followed by processing with application of Iron(III) chloride solution).

It has been experimentally proved that a natural sorbent modified via thermal and chemical processing is characterized by a high absorption capacity to heavy metal ions contained in water solutions, in particular to chromium(VI) ions, copper(II) ions and aluminum(III) ions with the purification degree ranging from 5% to 83%. The highest adsorption rate, 83%, is demonstrated by the combined method of bentonite clay modification, therefore proving the effectiveness of application of environmentally friendly natural sorbents for wastewater treatment processes aimed at removing heavy metal ions. The paper indicates the advantages of wastewater treatment sorption methods allowing removal of pollutants of different origin and any concentration.

**Key words:** wastewater, bentonite clays, sorbent, adsorption, modification.

## **АНАЛИЗ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИРОДНЫХ СОРБЕНТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ВОДНЫМ РАСТВОРАМ СОЕДИНЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ**

**Е.М. Хоменко, О.В. Егорова, О.А. Мыслюк**

*Черкасский государственный технологический университет  
бул. Шевченка, 460, 18006, Черкассы, Украина, o.khomenko@chdtu.edu.ua  
<https://orcid.org/0000-0001-9329-0577>*

Основными предпосылками возникновения в стране кризисного экологического состояния, связанного с загрязнением поверхностных вод, является нерациональное



использование водных ресурсов с нарушением экологических требований, сброс в водные объекты неочищенных и недостаточно очищенных промышленных и коммунальных сточных вод. Весь комплекс рассматриваемых факторов является причиной истощения и загрязнения поверхностных вод Украины, снижения их самоочистки, что приводит к деградации водных экосистем.

Превышение содержания ионов тяжелых металлов в поверхностных водах оказывает негативное влияние на окружающую среду, вызывает острые и хронические заболевания населения. Попадание таких поллютантов в поверхностные воды практически полностью обуславливается антропогенной хозяйственной деятельностью и значительную долю этих загрязнений составляют стоки сточных вод предприятий стратегических для Украины промышленных направлений: химического, целлюлозно-бумажного, кожевенно-мехового, а особенно черной и цветной металлургии.

Среди различных методов устранения ионов тяжелых металлов из водных сред одними из наиболее эффективных и популярными остаются сорбционные методы, преимущественно благодаря тому, что при сравнительно небольших затратах удается достичь высокой степени очистки. Наряду с адсорбентами, традиционно применяемыми в этих процессах, в последнее время проводится ряд исследований и практических внедрений с использованием в качестве адсорбентов природных дисперсных минералов.

Целью данной работы является исследование сорбционной способности и эффективности применения природного и модифицированного сорбента – бентонитовой глины – в процессах очистки водных растворов, содержащих в своем составе ион тяжелых металлов в виде растворенных соединений и обоснование перспектив их использования.

Исследована сорбционная способность природных глинистых сорбентов – бентонитовой глины Черкасского месторождения (Дашуковское месторождение) по отношению к водным растворам соединений тяжелых металлов. Предложена методика модификации бентонитовой глины с целью повышения ее адсорбционной способности к ионам тяжелых металлов тремя способами: физическим (термическим), химическим (обработка раствором феррум (III) хлоридом) и комбинированным (термообработка исходного сорбента) с последующей обработкой раствором.

Экспериментально доказано, что модифицированный природный сорбент путем термической и химической обработок характеризуется высокой поглощающей способностью ионов тяжелых металлов из водных растворов, в частности ионов хрома (VI), купрума (II) и алюминия (III), степень очистки которых находится в пределах от 5 % до 83%. Самая высокая степень поглощения, 83%, наблюдается для комбинированного способа модификации бентонитовой глины, что доказывает эффективность использования экологически безопасных природных сорбентов в процессах очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Приведены преимущества сорбционных методов очистки сточных вод с возможностью извлечения загрязняющих веществ различного происхождения и концентрации.

**Ключевые слова:** сточные воды; бентонитовые глины; сорбент; адсорбция; модификация

*Подання до редакції: 04. 11. 2021  
Надходження остаточної версії: 15. 11. 2021  
Публікація статті: 26. 11. 2021*