



UDC [661.183:661.87]:628.1

**COMPLEX RESEARCH OF NEW ADSORPTION MATERIALS**

Iryna K. Yakymenko\*, Tetyana V. Solodovnik

Cherkasy State Technological University, Shevchenko Blvd 460, Cherkasy 18006, Ukraine

Received 15 July 2023; accepted 25 February 2024; available online 25 April 2024

**Abstract**

In this work, a comprehensive comparative study of adsorbents obtained by combining coconut coal with coagulants based on aluminium salts ( $Al_2(SO_4)_3$  and  $AlCl_3$ ) and flocculants (sodium alginate and chitosan) was obtained and carried out for the removal of iron and manganese ions from model solutions. Adsorbents based on coconut coal and flocculants were obtained by the impregnation method followed by drying at a temperature of 50 °C for 6 hours (KAU+X1, KAU+X2 and KAU+AH). Adsorbents based on coconut coal and coagulants were produced by adding aluminum salts to an aqueous solution of urea at a temperature of 95 °C with intensive stirring for 30 minutes using coconut coal (KAU+ AIC KAU+AIS). The adsorbents were tested for their ability to remove iron and manganese ions from water systems. The comparative characteristics were based on the results of the adsorption kinetics study. It was found that the most effective adsorbent for removing iron and manganese ions is based on coconut coal and sodium alginate flocculant (KAU+AH), in comparison with coconut coal alone. The recommended contact duration for the adsorbent and adsorbate is 60 minutes. This duration achieves an effective degree of purification for ferric ions (82.5 %) and manganese ions (84.65 %). Compared to KAU coconut coal and other studied adsorbents, the purification rates for iron ions and manganese ions are 7–15 % and 18–20 % higher, respectively. The study determined that the optimal dose of KAU+AH adsorbent is 5 g/dm<sup>3</sup>. The advantages of this adsorbent, which is characterized by a high degree of extraction of iron and manganese ions in static conditions and can be recommended for cleaning aqueous solutions and further research in dynamic conditions, are given.

*Keywords:* adsorption; coconut coal; coagulants; flocculants; iron; manganese.

**КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ АДСОРБЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Ірина К. Якименко, Тетяна В. Солодовнік

Черкаський державний технологічний університет, бульвар Шевченка 460, Черкаси, 18006, Україна

**Анотація**

У роботі було отримано та проведено комплексне порівняльне дослідження адсорбентів, отриманих поєднанням кокосового вугілля та коагулянтів на основі солей алюмінію ( $Al_2(SO_4)_3$  та  $AlCl_3$ ) і флокулянтів (альгінату натрію та хітозану), для видалення іонів феруму та мангану з модельних розчинів. Адсорбенти, на основі кокосового вугілля та флокулянтів, отримували методом просочування з подальшим висушуванням за температури 50 °C впродовж 6 годин (KAU+X1, KAU+X2 та KAU+AH). Одержання адсорбентів на основі кокосового вугілля та коагулянтів проводили додаванням солей алюмінію до водного розчину карбаміду за температури 95 °C з інтенсивним перемішуванням впродовж 30 хв з кокосовим вугіллям (KAU+ AIC KAU+AIS). Отримані адсорбенти були перевірені на ефективність вилучення іонів феруму та мангану з водних систем, та за результатами дослідження кінетики адсорбції наведено їх порівняльні характеристики. Встановлено, що найбільш ефективним для видалення іонів феруму та мангану в порівнянні з кокосовим вугіллям є адсорбент на основі кокосового вугілля та флокулянту альгінату натрію (KAU+AH). Оптимальна тривалість контактування даного адсорбенту з адсорбатом складає 60 хв; за цей час досягається ефективний ступінь очищення для іонів феруму – 82.5 %, іонів мангану – 84.65 %, що на 7–15 % для іонів заліза та на 18–20 % для іонів мангану більше в порівнянні з кокосовим вугіллям KAU та іншими досліджуваними адсорбентами. Встановлено оптимальну дозу адсорбенту KAU+AH, що складає 5 г/дм<sup>3</sup>. Наведено переваги даного адсорбенту, який характеризується високим ступенем вилучення іонів заліза та мангану в статичних умовах і може бути рекомендованим для очищення водних розчинів та подальшого дослідження в динамічних умовах.

*Ключові слова:* адсорбція; кокосове вугілля; коагулянти; флокулянти; залізо; манган.

\*Corresponding author: e-mail: yakimenko97@ukr.net

© 2024 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v32i1.284703

## **Вступ**

На сьогодні забезпечення питною водою населення в Україні та у всьому світі здійснюється в основному за допомогою систем централізованого та децентралізованого водопостачання. Децентралізоване постачання – це трубчаті або шахтні колодязі, джерела та каптажі, що можуть поєднувати в собі атмосферні, підземні та поверхневі води. Децентралізовані води містять багато небажаних домішок, одними з яких є сполуки феруму та мангану. Наявність таких домішок у воді є досить небезпечною для здоров'я людини. За своєю хімічною будовою сполуки феруму та мангану близькі між собою та зазвичай у воді містяться одночасно – надходять до водойм в процесі розчинення різноманітних мінеральних порід. Також сполуки феруму, мангану та інших елементів присутні в ґрунтах і є звичайними мінеральними відкладеннями. В поверхневих водах їх концентрації, як правило, досить низькі. Однак у ґрунтових водах концентрації обох елементів можуть бути значно вищими, оскільки вода довше перебуває під землею в контакт з породами, що містять ці мінерали [1].

Підвищення концентрації сполук феруму та мангану в питній воді внаслідок природної та антропогенної діяльності стало серйозною проблемою, яка негативно впливає на здоров'я людини. Видобуток корисних копалин і пов'язана з ним діяльність має якісний та кількісний вплив на водні режими в шахтах і навколо них. Надмірне накопичення сполук феруму може викликати незворотні проблеми зі здоров'ям у людей, такі як гемохроматоз, захворювання серця та центральної нервової системи, цироз печінки, діабет, нудота тощо [2].

Збільшена концентрація сполук феруму та мангану у питній воді, своєю чергою, може призвести до несприятливих ефектів і різноманітних симптомів, пов'язаних з нейротоксичністю, включаючи когнітивні функції, хворобу Паркінсона, манганізм, дистонію, а також такі симптоми у рослин, як хлороз листя та некротичні плями листя [3].

У глибоких колодязях, де вміст кисню низький, ґрунтові води, які містять сполуки феруму та мангану, прозорі й безбарвні. У такій воді ці елементи знаходяться в розчиненому вигляді, однак під впливом повітря вони здатні окиснюватися і змінюватися з безбарвних, розчинених форм

на кольорові, тверді форми (часто у формі дуже дрібних частинок). Окиснення розчинених у воді частинок сполук феруму перетворює їх на білі, потім жовті й, нарешті, на червоно-коричневі тверді частинки, які осаджуються з води. Сполуки феруму, які не утворюють частинок достатнього розміру, щоб осаджуватись, у завису, тобто у вигляді колоїду, надають воді червоного відтінку. Сполуки мангану зазвичай розчиняються у воді, хоча деякі неглибокі колодязі містять їх колоїдний розчин, який надає воді чорного відтінку.

Відкладення сполук феруму та мангану можуть накопичуватися в трубах і баках водонагрівачів та пом'якшувачів води. Накопичення даних елементів стає не тільки екологічною, але й економічною проблемою через необхідність постійної заміни обладнання. Також зростають витрати на енергію, пов'язані з перекачуванням води через звужені труби або нагріванням води за допомогою електричних нагрівальних стрижнів, покритих залізом або марганцевими відкладеннями.

Також великою проблемою, яка дуже часто виникає, якщо у воді високий рівень сполук феруму та мангану, є наявність бактерій. Показником наявності таких бактерій є неприємний запах. Дані бактерії зустрічаються в ґрунті, неглибоких водоносних горизонтах і деяких поверхневих водах. Бактерії не є загрозою для здоров'я людини, але можуть утворювати червоно-коричневі (сполук феруму) або чорно-коричневі (сполук мангану) шари слизу, які часто з'являються в туалетних бачках, і можуть засмічувати системи водопостачання [4].

На даний час важливою загальною потребою людства постає забезпечення всіх населених пунктів чистою питною водою. Першим кроком для цього є виявлення у воді небезпечних концентрацій сполук феруму та мангану. Зазвичай їх вміст в природних водах не перевищує декількох десятків міліграм на літр, а в шахтних водах досягає декількох сотень міліграм на літр і більше.

Найпоширенішим способом очищення води, яка містить сполук феруму понад 1 мг на літр є окиснення або аерація. Аерація, в поєднанні з піддуванням води розчином  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  або  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  і фільтруванням, – універсальний метод, який дозволяє видаляти

сполуки феруму у всіх формах з підземних і поверхневих вод.

Ще одним із сучасних напрямків очищення підземних вод є біологічний спосіб, який ґрунтується на висіванні та нарощуванні на зернах завантаження фільтра бактерій типу *Metallogenium personatum*, *Caulococcus manganifer*, *Bacteria manganicus* з подальшим фільтруванням очищеної води. Такі бактерії здатні поглинати сполуки феруму та мангану з води в процесі життєдіяльності, а, відмираючи, утворювати на зернах носія пористу масу, яка містить велику кількість оксидів мангану, що є додатковим каталізатором окиснення Ферум(II)- і Манган(II) іонів.

Також досить перспективним є метод флотаційного виділення дисперсних і колоїдних домішок з природних вод внаслідок різкого скорочення тривалості процесу (в 3–4 рази) у порівнянні з осадженням або обробкою в шарі зваженого осаду [5].

Однак найбільш простими та ефективними у використанні є методи очищення води з використанням адсорбції, коагуляції та фільтрації. Адсорбція отримала широке визнання серед методів очищення води від сполук феруму, оскільки вона має економічні та екологічні переваги, а саме: низька вартість, доступність, прибутковість, простота експлуатації та висока ефективність видалення сполук. Так, у роботі [6] було порівняно дві повномасштабні очисні установки для питної води, одна з яких містить фільтр з двома середовищами (антрацит і кварцовий пісок), а інша містить два фільтри з одним середовищем (кварцовий пісок) з метою визначення взаємодії між фізико-хімічними та біологічними процесами, що контролюють видалення іонів амоніаку, феруму та мангану. Було встановлено, що обидві установки продемонстрували практично однакову продуктивність і роздільність процесу, причому більша частина видалення іонів амоніаку та мангану відбувалася лише після повного видалення сполук феруму.

Одним із важливих факторів використання сорбентів є їх доступність та дешевизна. Авторами [7] проведено аналіз застосування активованого вугілля, виготовленого з різних сільськогосподарських відходів, для видалення іонів феруму шляхом періодичної адсорбції та адсорбції в нерухомому шарі та встановлено, що адсорбція за допомогою недорогих адсорбентів, виготовлених з

агровідходів, перевищує можливості звичайних технологій очищення води та вважається найбільш прийнятною для сільської місцевості.

Дослідниками [8] використано вермикулітову глину та катіонообмінну смолу як адсорбент і фільтруюче середовище для перевірки їх здатності видаляти та утримувати важкі метали (Fe та Mn) з водних розчинів. Встановлено, що глина здатна утримувати від 70 до 100 % іонів феруму та приблизно 88 % іонів мангану, а катіонообмінні смоли видаляють 43–78 % іонів феруму та 95–100% іонів мангану.

Авторами [9] встановлено, що активоване вугілля, виготовлене з вугілля деревини тика (*Tectona grandis*) і деревини ши (*Vitellaria paradoxa*) з ефективним розміром зерен 0.075–0.2 мм і 0.2–2.0 мм, видаляє 92.5–100 % Fe та Mn зі змодельованих підземних вод з низьким потоком, характерним для свердловин. Для отримання даних випробувань безперервного потоку використовували фіксовані колонки, наближені до моделей адсорбції Адама-Бохарта, Томаса та Юна-Нельсона.

У роботі [10] показано, що біовугілля фінікової пальми можна використовувати як недорогий, ефективний та екологічно чистий адсорбент для видалення іонів мангану та нітратів із забруднених ґрунтових вод. Ефективність видалення становить 73.20 % для іонів мангану та 94.94 % для нітратів, а адсорбційна здатність складає 3.57 мг/г та 4.18 мг/г для іонів мангану та нітратів відповідно (умови проведення дослідження: рН=6, доза сорбенту 0.1 г і час адсорбції 1200 хв).

Авторами [11] досліджені адсорбційні властивості активованого вугілля, отриманого з кісток великої рогатої худоби, в процесі видалення іонів Mn(II) зі змодельованих ґрунтових вод. Максимальна ефективність очищення кістковим вугіллям за 60 хв – 99.2 % в лабораторних контрольованих умовах, що свідчить про перспективність використання даного вугілля для очищення ґрунтових вод від сполук мангану. Також вугілля з кісток великої рогатої худоби характеризується як безпечний і екологічно прийнятний адсорбент.

Було запропоновано спосіб очищення води від іонів феруму та мангану сорбентами на основі магнетиту, що здатен сорбувати окиснені та гідролізовані сполуки мангану в процесах окиснення [12].

Дослідниками [13] отримано Ni-вмісний вуглецевий адсорбент, що має поліфункціональний характер, з високою аніоно- та катіонообмінною ємністю. Модифіковане нікелем активоване вугілля показало адсорбційну ємність щодо іонів Fe у три рази вищу порівняно з вихідним активованим вугіллям, що доводить його високу ефективність для знезалізнення і дає можливість рекомендувати його для очищення природних вод.

Науковцями [14] запропоновано використовувати відходи після обробки води, що складаються з мулу, глини та небажаних компонентів, для синтезу геополімеру, який має потенціал для видалення іонів Fe та Mn із забрудненої води осадженням.

Окрім адсорбентів, широке застосування отримали коагулянти та флокулянти, що здатні очищувати воду від таких показників як мутність, кольоровість, вміст токсичних елементів та важких металів [15].

Авторами в роботах [16–17] були представлені результати, присвячені вивченню властивостей флокулянтів на прикладі хітозану та альгінату натрію, встановлено перспективність їх застосування в коагуляційно-флокуляційних процесах очищення забарвлених стоків. Досліджено та доведено ефективність хітозану у видаленні різних типів барвників порівняно з альгінатом натрію за спільної дії з традиційним коагулянтном на основі алюмінію ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ). Виявлено властивість хітозану видаляти залишковий вміст іонів (на прикладі  $\text{Fe}^{3+}$ ).

Таким чином, виходячи з аналізу літературних джерел, встановлено, що питання розробки та дослідження властивостей нових адсорбентів для видалення іонів мангану та феруму в системах децентралізованого водопостачання є актуальним. Тому *метою даної роботи* є розробка адсорбентів на основі активованого кокосового вугілля з використання різного типу коагулянтів та флокулянтів, оцінка їх ефективності та селективності та надання рекомендацій для їх використання в системах децентралізованого водопостачання. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання: отримати адсорбенти, дослідити кінетику адсорбції, визначити оптимальний час контакту адсорбентів з модельними розчинами, за ступенем вилучення іонів феруму та мангану встановити найбільш ефективний адсорбент в порівнянні з

кокосовим вугіллям, визначити його оптимальну масу в діапазоні досліджуваних концентрацій; провести дослідження очищених водних розчинів на наявність залишкового алюмінію.

### Експериментальна частина

*Матеріали та обладнання.* Адсорбційні матеріали були виготовлені на основі кокосового активованого вугілля (КАУ), який використовували як основу для отримання комбінованих адсорбентів. У якості коагулянтів застосовували солі алюмінію, а саме: алюміній сульфат технічний  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  та алюміній хлорид  $\text{AlCl}_3$  (ч.д.а.), а в якості флокулянтів – альгінат натрію (харчова добавка E401), хітозан харчовий низькомолекулярний ТУ 9289-067-00472124-03 (хітозан 1) та хітозан кислоторозчинний зі ступенем деацетилювання 82 % ТУ 9289-067-00472124-03 (хітозан 2) [18–20]. Для порівняння адсорбційних властивостей отриманих адсорбентів використовували традиційне кокосове вугілля КАУ з ефективним розміром пор 2.36–4.75 мм, насипною щільністю 0.49–0.53 г/см<sup>3</sup> та загальною площею поверхні 1050–1150 м<sup>2</sup>/г.

Для проведення експериментів використовували ряд модельних розчинів:

– модельний розчин № 1, який отримували розчиненням 0.01 г  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  та 0.0015 г  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  в 1 дм<sup>3</sup> дистильованої води, розрахункова концентрація іонів феруму 2 мг/дм<sup>3</sup>, а мангану – 0.5 мг/дм<sup>3</sup>, що відповідає 10-кратному перевищенню ГДК (показники для водопровідної води) [21];

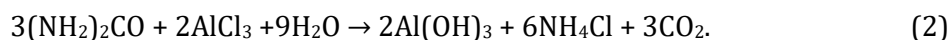
– модельний розчин №2 з концентрацією іонів феруму 2.0 мг/дм<sup>3</sup>;

– модельний розчин №3 з концентрацією іонів мангану 0.5 мг/дм<sup>3</sup>;

– модельний розчин №4, який отримували розчиненням 0.075 г  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  та 0.0113 г  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  в 150 см<sup>3</sup> дистильованої води, розрахункова концентрація іонів феруму 100 мг/дм<sup>3</sup>, а мангану – 25 мг/дм<sup>3</sup>.

*Методика отримання адсорбентів* КАУ+ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (далі КАУ+АІS) та КАУ+  $\text{AlCl}_3$  (далі КАУ+АІС). Для отримання даних адсорбентів використовували кокосове вугілля (КАУ) і солі алюмінію ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  та  $\text{AlCl}_3$ ), які перемішували у співвідношенні на 1 г активованого вугілля 40 мг гідроксиду алюмінію. Наважку солі  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  масою 8.77 г та наважку солі  $\text{AlCl}_3$  масою 6.84 г в різних ємностях змішували з 200 см<sup>3</sup> водного розчину карбаміду

концентрацією 25 %. До одержаних розчинів додавали по 100.0 г кокосового вугілля за постійного перемішування та нагрівання за



Охолодження та відділення адсорбентів від фільтрату проводили фільтруванням та багаторазовою промивкою дистильованою водою. Висушування матеріалу проводили за температури 105 °С в сушильній шафі впродовж 6 годин [22].

*Методика отримання адсорбентів* КАУ+хітозан 1 (далі КАУ+Х1), КАУ+хітозан 2 (далі КАУ+Х2) та КАУ+альгінат натрію (далі КАУ+АН). Оскільки флокулянти мають полімерну структуру, яка може руйнуватися з підвищенням температури, поєднання кокосового вугілля з флокулянтами проводили методом просочування впродовж 24 годин, з розрахунку 40 мг флокулянту на 1 г вугілля. Для цього 40 мг хітозану розчиняли у 1 % розчину ацетатної кислоти, а 40 мг альгінату натрію у воді. В отримані розчини флокулянтів при перемішуванні додавали по 1 г кокосового вугілля та залишили на 24 години. Відділення адсорбентів від розчину проводили фільтруванням, промивкою та висушуванням в сушильній шафі при температурі 50°C впродовж 6 годин з постійним перемішуванням та подальшим подрібненням гранул [17].

*Дослідження кінетики процесу адсорбції* проводили відповідно методики [23]. Для цього в 5 конічних колб об'ємом 250 см<sup>3</sup> вносили по 100 см<sup>3</sup> модельного розчину №1 та додавали 0,1 г адсорбенту (з розрахунку 1 г адсорбенту на 1 дм<sup>3</sup> модельного розчину). Колби встановлювали в апарат для струшування. Тривалість адсорбції 5, 10, 25, 40 та 60 хвилин. Після закінчення процесу адсорбції відокремлювали фільтрат (фільтр синя стрічка) та аналізували його на залишковий вміст іонів феруму та мангану.

Ступінь вилучення іонів (X, %) розраховували за формулою:

$$X = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \cdot 100\%$$

де  $c_0$  і  $c_1$  – вихідна і кінцева концентрація іонів відповідно, мг/дм<sup>3</sup>.

*Визначення оптимальної маси адсорбенту* проводили в статичних лабораторних умовах. В 5 конічних колб об'ємом 250 см<sup>3</sup> вносили по 100 см<sup>3</sup> модельного розчину №2 та додавали

95 °С впродовж 30 хвилин. У ході цього відбувалися наступні реакції:

0,2, 0,5, 1, 2, 3 г адсорбенту. Колби встановлювали в апарат для струшування. Тривалість адсорбції 20 хвилин. Аналогічні дії повторювали і для модельного розчину № 3. Після закінчення процесу адсорбції відокремлювали фільтрат (фільтр синя стрічка) та аналізували його на залишковий вміст іонів феруму та мангану.

*Визначення ступеня вилучення в широкому діапазоні концентрацій* іонів феруму та мангану, які відповідають їх вмісту в природних водах [24; 25]. В 5 конічних колб об'ємом 250 см<sup>3</sup> вносили по 1 г адсорбенту та додавали розчини різної концентрації, які були отримані розведенням модельного розчину 4 та в яких іони феруму та мангану залишались у співвідношенні 4:1. Колби встановлювали в апарат для струшування. Тривалість адсорбції 20 хвилин. Після закінчення процесу адсорбції відокремлювали фільтрат (фільтр синя стрічка) та аналізували його на залишковий вміст іонів феруму та мангану

Визначення початкової та залишкової концентрації іонів феруму та мангану в пробах проводили методом атомно-емісійної спектроскопії (ICPE) на спектрометрі марки ICPE-9800 (Shimadzu, Japan) [26].

### Результати та їх обговорення

Для перевірки ефективності нових адсорбційних матеріалів було проведено серію досліджень, а саме: дослідження кінетики адсорбції для визначення оптимального часу контакту адсорбентів з модельними розчинами, а також визначення оптимальної маси завантаження та ступеня вилучення політантів в діапазоні досліджуваних концентрацій.

*Дослідження кінетики процесу адсорбції.*

Використовували модельний розчин №1, в якому одночасно присутні іони феруму та мангану. Як видно з графічних залежностей, представлених на рисунках 1 та 2, для всіх адсорбентів ефективний час проведення адсорбції складає 60 хв. Ступінь вилучення іонів феруму адсорбентами на основі кокосового вугілля та коагулянтів КАУ+АІS і

КАУ+АІС відповідно 36 % і 77 % (рис. 1), а іонів мангану – 30 % і 65 % (рис. 2). Для адсорбентів на основі кокосового вугілля та флокулянту хітозану КАУ+Х1 та КАУ+Х2 ступінь вилучення іонів феруму складає 49 % та 63 % відповідно (рис. 1), а іонів мангану – 41 % і 58 % (рис. 2). Всі вище наведені адсорбенти характеризуються меншим значенням ступеня вилучення як іонів феруму, так і іонів мангану в порівнянні з вихідним немодифікованим кокосовим вугіллям КАУ.

Але для адсорбенту на основі кокосового вугілля та флокулянту альгінату натрію (КАУ+АН) можемо спостерігати стабільне високе значення ступеня вилучення (98 % та 97 % іонів феруму та мангану відповідно). Це свідчить про збільшення ступня очищення приблизно на 8 % у вилученні іонів феруму, та на 15 % у вилученні іонів мангану в порівнянні з кокосовим вугіллям та іншими досліджуваними сорбентами.

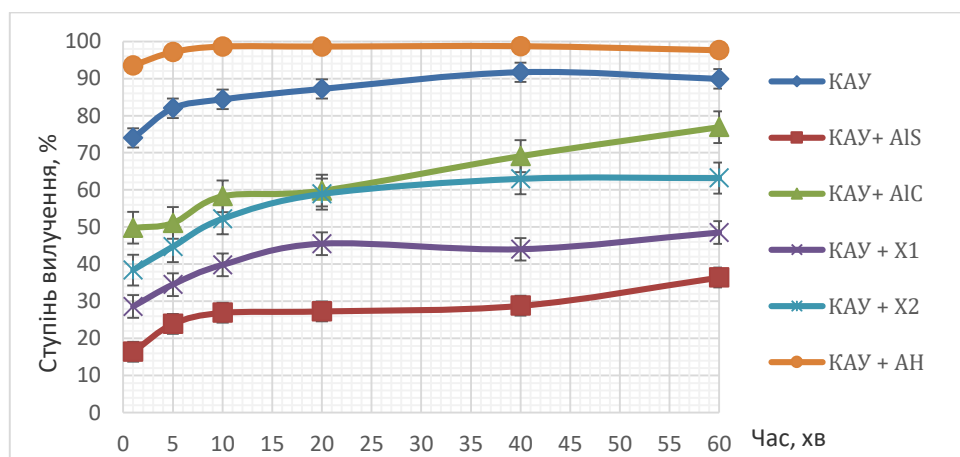


Fig. 1. Dependence of the degree of extraction of iron ions from model solutions on the duration of adsorption  
Рис. 1 Залежність ступеня вилучення іонів феруму з модельних розчинів від тривалості адсорбції

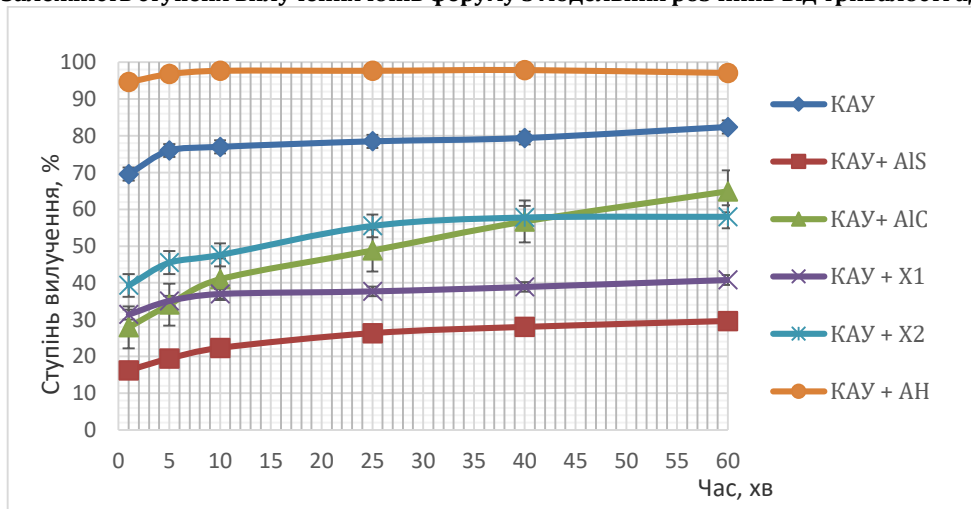


Fig. 2. Dependence of the degree of extraction of manganese ions from model solutions on the duration of adsorption  
Рис. 2 Залежність ступеня вилучення іонів мангану з модельних розчинів від тривалості адсорбції

Актуальним завданням у ході використання коагулянтів на основі алюмінію є дослідження очищеної води на наявність залишкового алюмінію. У зв'язку з цим нами були проаналізовані розчини після застосування алюмінієвмісних адсорбентів та встановлено, що для КАУ+АІС спостерігається збільшення концентрації алюмінію в очищеній воді за збільшення тривалості контакту з адсорбентом (табл. 1). А для КАУ+АІС концентрація іонів алюмінію залишається в межах гранично допустимих

концентрацій (тобто менше 0.5 мг/дм<sup>3</sup>) впродовж всього досліджуваного часу адсорбції [21]. Даний факт можна пояснити тим, що комбінація кокосового вугілля з алюмінію гідроксидом не є стійкою, і в процесі контакту з іонами модельного розчину Al<sup>3+</sup>-іони вивільняються з комплексу, не взаємодіючи з іонами забрудників.

За результатами дослідження кінетики процесу адсорбції (рис. 1–2, табл. 1) встановлено, що з усіх отриманих адсорбентів найбільш ефективним для вилучення іонів

феруму та мангану, в порівнянні з кокосовим вугіллям, є комбінований адсорбент КАУ+АН, який можна рекомендувати для подальших досліджень та для застосування.

Table 1

## The content of aluminum ions in the purified model solution

Таблиця 1

## Вміст іонів алюмінію в очищеному модельному розчині

Час	КАУ+ АІS	КАУ+ АІC
	Al <sup>3+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Al <sup>3+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>
5	0.252	0.0451
10	0.862*	0.0156
25	1.13*	0.0823
40	1.99*	0.127
60	2.16*	0.207

\*- гранично допустима концентрація 0.5 мг/дм<sup>3</sup> згідно з [21].

## Визначення оптимальної маси адсорбентів

Для адсорбентів КАУ+АН та для КАУ проводили визначення оптимальної маси. Для цього процес адсорбції проводили в статичних умовах з використанням модельних розчинів №2 і №3.

оптимальна маса адсорбенту КАУ+АН для вилучення іонів феруму з модельного розчину №2 (концентрація якого 2.0 мг/дм<sup>3</sup>) 2 г, до того ж досягається 90 % очищення. Для кокосового вугілля оптимальна маса складає 1 г.

Аналіз графічних залежностей, представлених на рис. 3, доводить, що

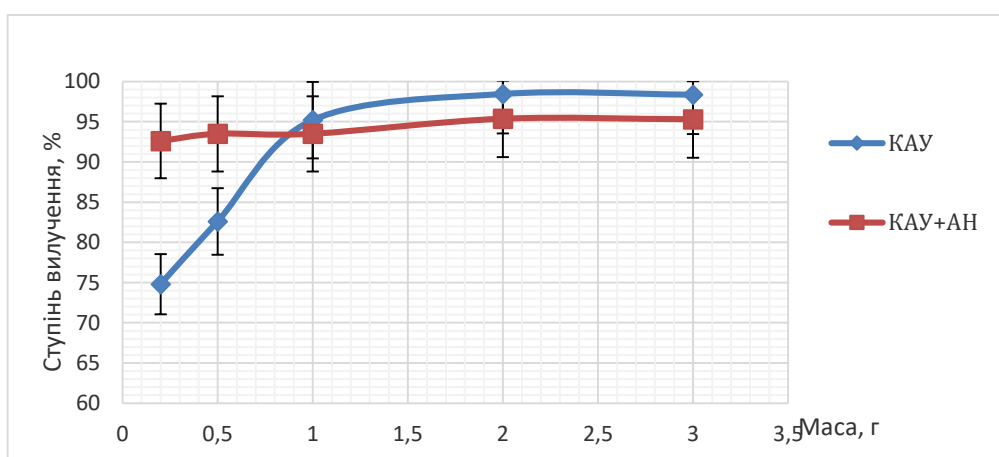


Fig. 3. Dependence of the degree of extraction of iron ions from model solutions on the mass of the adsorbent  
Рис. 3. Залежність ступеня вилучення іонів заліза з модельних розчинів від маси адсорбенту

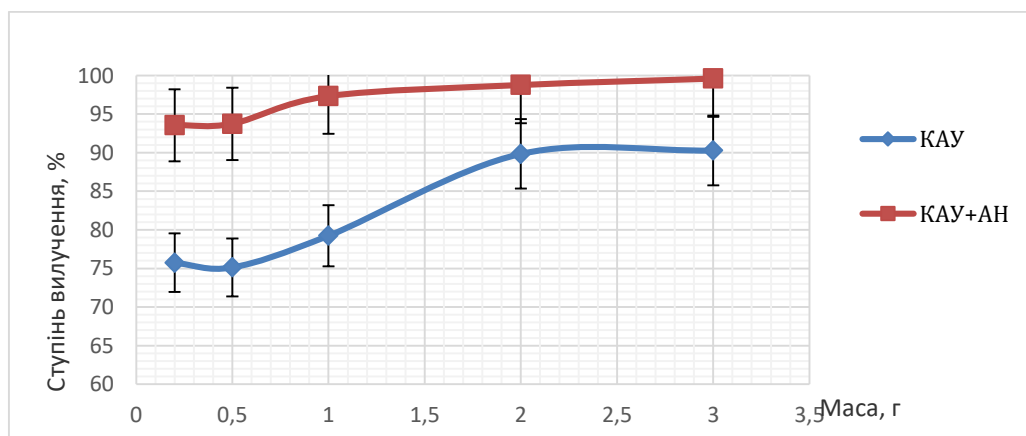


Fig. 4. Dependence of the extraction rate of manganese ions from model solutions on the mass of the adsorbent  
Рис. 4 Залежність ступеня вилучення іонів мангану з модельних розчинів від маси адсорбенту

За графічними залежностями, які представлені на рис. 4, визначили оптимальну масу адсорбенту КАУ+АН для вилучення іонів мангану з модельного розчину №3 (концентрація іонів мангану в якому 0.5 мг/дм<sup>3</sup>), що складає 1 г, і досягається 97 % очищення. Для кокосового вугілля оптимальна маса складає 2 г за ступеня очищення 90 %.

Узагальнення даних, які представлені на рис. 3 та 4, дає можливість встановити оптимальні маси для КАУ+АН – 5 г/дм<sup>3</sup> та для КАУ – 20 г/дм<sup>3</sup>.

Визначення ступеня вилучення з розчинів в широкому діапазоні концентрацій.

У зв'язку з тим, що діапазон концентрацій загального заліза в ґрунтових водах може варіюватися від 0.01 до 26.0 мг/дм<sup>3</sup>, а вміст сполук мангану від 0.02 до 4 мг/дм<sup>3</sup>, є потреба в проведенні дослідження адсорбційних властивостей адсорбенту КАУ+АН в широкому діапазоні концентрацій даних елементів та провести порівняння з адсорбційними властивостями КАУ. Для приготування серії розчинів з різною концентрацією елементів використовували відповідне розведення

модельного вихідного розчину №4. Для дослідження використовували масу адсорбентів 1 г.

Результати дослідження ступеня вилучення іонів феруму залежно від концентрації модельних розчинів представлені на рис. 5. Встановлено, що для адсорбентів КАУ+АН та КАУ спостерігається доволі ефективна адсорбція за концентрації іонів феруму 10 мг/дм<sup>3</sup>, ступені вилучення відповідно складають 95 та 80 %. За умови подальшого збільшення концентрації розчинів до 20 мг/дм<sup>3</sup> ступінь вилучення зменшується до 85 та 70 % для КАУ+АН та КАУ відповідно.

В ході досліджень розчинів з вмістом іонів мангану різної концентрації встановлено, що стабільна та ефективна адсорбція характерна для адсорбенту на основі альгінату натрію для всіх концентрацій досліджуваних розчинів та знаходиться в межах 92–95 % (рис. 6). Що стосується неактивованого кокосового вугілля, то ми спостерігаємо поступове зниження ступеня вилучення від 80 % до 51 % за збільшення концентрації від 1.0 до 5 мг/дм<sup>3</sup> відповідно.

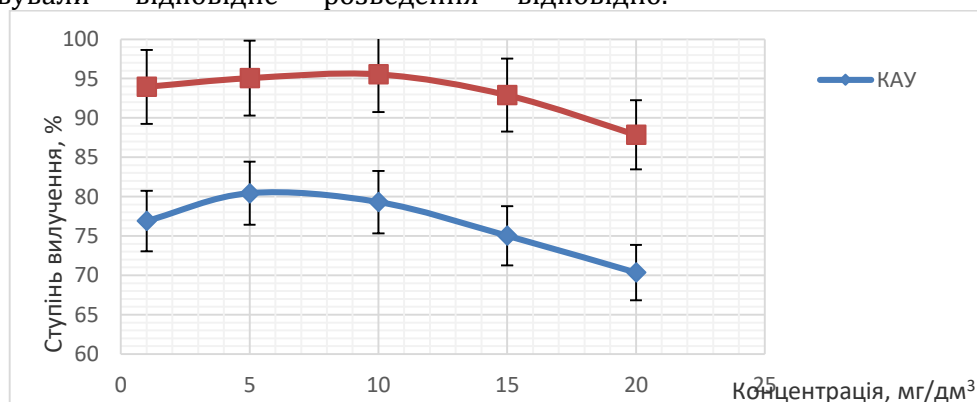


Fig. 5. Dependence of the degree of extraction of iron ions from model solutions on iron concentration  
Рис. 5. Залежність ступеня вилучення іонів феруму з модельних розчинів від концентрації феруму

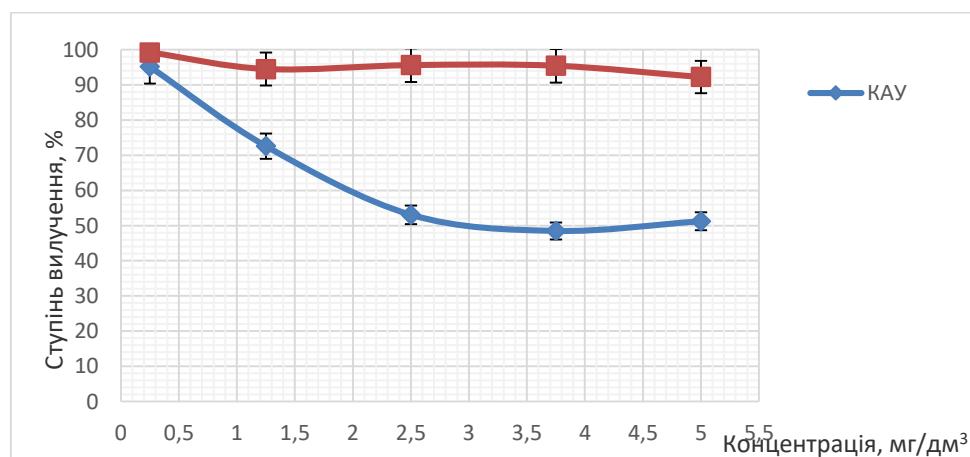


Fig. 6. Dependence of the degree of extraction of manganese ions from model solutions on manganese concentration  
Рис. 6. Залежність ступеня вилучення іонів мангану з модельних розчинів від концентрації мангану



## Висновки

На основі отриманих у цій роботі даних встановлено, що:

- адсорбент КАУ+АІS, на основі активованого вугілля та коагулянту  $Al_2(SO_4)_3$ , характеризується низькою ефективністю очищення розчинів як від іонів феруму, так і від іонів мангану, а також процес адсорбції супроводжується забрудненням очищеного розчину іонами алюмінію, яке перевищує значення ГДК для питної води, обробленої реагентами;

- адсорбент КАУ+АІС, який є поєднанням активованого вугілля та коагулянту  $AlCl_3$ , також супроводжується виділенням іонів алюмінію в розчин, хоча їх концентрація залишається в межах гранично допустимих концентрацій – 0.5 мг/дм<sup>3</sup>;

- адсорбенти КАУ+Х1 та КАУ+Х2, які є поєднанням активованого вугілля та флокулянту хітозану, показали неефективність їх застосування для вилучення іонів феруму та мангану з розчинів;

- адсорбент КАУ+АН, на основі активованого вугілля та флокулянту альгінату натрію ефективно видаляє як іони феруму, так і іони мангану в широкому діапазоні концентрацій елементів, ступінь вилучення знаходиться в межах від 80 % до 90 %;

- оптимальними умовами для використання розроблених адсорбентів в статичних лабораторних умовах є: час контакту 60 хв та маса наважки адсорбентів в межах 5–20 г на 1 дм<sup>3</sup> розчину.

Таким чином, в результаті аналізу даних проведеного дослідження встановлено, що адсорбенти на основі кокосового вугілля з додаванням коагулянтів та флокулянтів, а саме: КАУ+АІS; КАУ+ АІС; КАУ+Х1 та КАУ+Х2, не є перспективними, в порівнянні з кокосовим вугіллям, для використання в адсорбційних процесах. У той самий час адсорбент КАУ+АН характеризується високим ступенем вилучення іонів заліза та мангану в статичних умовах і може бути рекомендованим для очищення водних розчинів та подальшого дослідження в динамічних умовах.

## References

- [1] Iron and manganese removal from water supplies. Water Treatment Services. <https://watertreatmentservices.co.uk/iron-manganese-removal-water-supplies/>
- [2] Naseem, T., Durrani, T. (2021). The role of some important metal oxide nanoparticles for wastewater and antibacterial applications: A review. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3, 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2020.12.001>
- [3] Dey, S., Tripathy, B., Kumar, M. S., Das, A. P. (2023). Ecotoxicological consequences of manganese mining pollutants and their biological remediation. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.01.001>
- [4] Dvorak, B., Schuerman, B. (2021). Drinking water: iron and manganese. *Institute of agriculture and natural resources Nebraska extension publications*. <https://extensionpublications.unl.edu/assets/html/g1714/build/g1714.htm> (date of access: 16.05.2023)
- [5] Voloshyn, M., Vladimirova, V. (2021). [Modern methods of water purification. Modern technologies and achievements of engineering sciences in the field of hydraulic engineering construction and water engineering: a collection of scientific works]. 3rd issue. - Kherson: KhSAEU. (in Ukrainian).
- [6] Corbera-Rubio, F., Laurenzi, M., Koudijs, N., Müller, S., van Alen, T., Schoonenberg, F., Lückner, S., Pabst, M., van Loosdrecht, M. C. M., van Halem, D. (2023). Meta-omics profiling of full-scale groundwater rapid sand filters explains stratification of iron, ammonium and manganese removals. *Water Research*, 233, 119805. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119805>
- [7] Das, S., Mishra, S., Sahu, H. (2023). A review of activated carbon to counteract the effect of iron toxicity on the environment. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.02.002>
- [8] Arafat, M., Marzouk, S. Y., El Monayeri, O. D. (2021). Hybrid system for iron and manganese reduction from polluted water using adsorption and filtration. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2465–2470. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.001>
- [9] Kwadjo Siabi, W., Degraft-Johnson Owusu-Ansah, E., Michelle Korkor Essandoh, H., Yaw Asiedu, N. (2021). Modelling the adsorption of iron and manganese by activated carbon from teak and shea charcoal for continuous low flow. *Water-Energy Nexus*, 4, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.02.001>
- [10] Fseha, Y. H., Sizirici, B., Yildiz, I. (2022). Manganese and nitrate removal from groundwater using date palm biochar: application for drinking water. *Environmental Advances*, 100237. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100237>
- [11] Michael, K., Wilson, A. W., Govender, P. P. (2022). Modelling of manganese-contaminated groundwater through batch experiments: Implications for bone char remediation. *Environmental Advances*, 10, 100323. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100323>
- [12] Gomelya M., Trus I., Tverdokhlib M. (2021). [Study of the efficiency of water purification from iron and manganese ions by magnetite-based sorbents]. *Problems of ecology and energy saving: Proceedings of the conference*, 11–15 (in Ukrainian)
- [13] Rudenko, V., Ivanenko, I. M., Kosogina I., Burmak, A. (2021). [New efficient carbon adsorbent for water deironing]. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (1), 144–154. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.1.2021.225318> (in Ukrainian)/
- [14] Pachana, P. K., Rattanasak, U., Nuithitikul, K., Jitsangiam, P., Chindaprasirt, P. (2022). Sustainable

- utilization of water treatment residue as a porous geopolymer for iron and manganese removals from groundwater. *Journal of Environmental Management*, 302, 114036.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114036>
- [15] Solodovnik, T., Yakymenko, I. K. (2021). [Problems and methods of drinking water purification in the systems of decentralized water supply]. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (2), 63–81.  
<https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.239703> (in Ukrainian).
- [16] Solodovnik, T.V., Tolstopalova, N. M., Fomina, N. M., Yakymenko, I. K. (2019). [Study of the processes of colored solutions purification using inorganic coagulants and natural flocculant]. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (3), 108–117.  
<https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.167654> (in Ukrainian).
- [17] Solodovnik, T., Yakymenko, I. (2021). [Research and improvement of flocculation-coagulation processes of purification of colored industrial wastes]. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (3), 94–102.  
<https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2020.213912> (in Ukrainian)
- [18] Mensah-Akutteh, H., Buamah, R., Wiafe, S., Nyarko, K. B. (2022). Optimizing coagulation–flocculation processes with aluminium coagulation using response surface methods. *Applied Water Science*, 12(8).  
<https://doi.org/10.1007/s13201-022-01708-1>
- [19] Gao, X., Guo, C., Hao, J., Zhao, Z., Long, H., Li, M. (2020). Adsorption of heavy metal ions by sodium alginate based adsorbent—a review and new perspectives. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 4423–4434.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.046>
- [20] Pontius, W. F. (2016). Chitosan as a drinking water treatment coagulant. *American Journal of Civil Engineering*, 4(5), 205.  
<https://doi.org/10.11648/j.ajce.20160405.11>.
- [21] [On the approval of State sanitary norms and rules "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption" (DSanPiN 2.2.4-171-10), Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 400 (2022)]. (In Ukrainian).  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
- [22] Litynska M. (2021). [Removal of arsenic compounds and humates from the water environment]: dis. candidate technical of Science. Kyiv. (in Ukrainian).
- [23] Ivanenko I. M., Dontsova T. A., Yu M. Fedenko. (2018) *Adsorption, adsorbents and catalysts based on them: textbook for students of specialty 161 "Chemical technologies and engineering" specialization "Chemical technologies of inorganic substances and water treatment"*. Kyiv : KPI named after Igor Sikorsky, 233 p. (in Ukrainian)
- [24] Astrelin, I., Ratnavira, H. (Eds.). (2015). *Physical and chemical methods of water purification. Management of water resources*. "Drukarnia Wolf" LLC. (in Ukrainian).
- [25] Andrusyshina I.M., Golub I.O., Lampeka O.G. (2018) *Manganese in water is a dangerous pollutant* All-Ukrainian "WaterNet" water company. Kyiv: UVO "WaterNet" (in Ukrainian)
- [26] Yakymenko, I. K., Solodovnik, T. V. (2023). [Adsorption materials for additional cleaning of drinking water from iron and manganese compounds in decentralized water supply systems]. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2(2), 72–77.  
<https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/13> (in Ukrainian).