

УДК 544.723.2:[628.316.12:667.2]

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13\(54\)-2187-2198](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13(54)-2187-2198)

Кичкирук Ольга Юріївна кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, <https://orcid.org/0000-0002-0558-1647>

Віленський Володимир Олексійович доктор хімічних наук, професор, професор кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, <https://orcid.org/0009-0007-3249-9423>

Свиридюк Катерина Петрівна асистент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, <https://orcid.org/0009-0000-1258-7644>

СОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ОРГАНІЧНИХ БАРВНИКІВ ПРИРОДНИМ БЕНТОНІТОМ

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена зростаючим антропогенним навантаженням на водні екосистеми внаслідок скидання стічних вод текстильної, хімічної та поліграфічної промисловості, що містять стійкі органічні барвники. Висока токсичність, канцерогенність та здатність до біоаккумуляції цих сполук потребують розробки високоефективних та економічно доступних методів очищення води. Природні глинисті мінерали, зокрема бентоніти, розглядаються як перспективна альтернатива дорогим синтетичним сорбентам завдяки їхній унікальній шаруватій структурі, високій питомій поверхні та можливості іонного обміну.

У даній роботі представлено результати комплексного дослідження сорбційних властивостей природного бентоніту щодо органічних барвників різних класів: метиленового синього (МС), кристалічного фіолетового (КФ) та конго червоного (КЧ). Досліджено кінетичні особливості процесу та встановлено вплив часу контакту фаз на ефективність вилучення полютантів з водних розчинів. Визначено, що стан сорбційної рівноваги досягається протягом перших 60–90 хвилин, залежно від природи адсорбату. На основі побудованих ізотерм сорбції проведено кількісну оцінку максимальної сорбційної ємності мінералу для кожного з досліджуваних барвників, що дозволило класифікувати бентоніт як високоефективний матричний матеріал.

Наукова новизна роботи полягає у проведенні порівняльного аналізу ефективності природного бентоніту стосовно барвників, що відрізняються за

іонним типом та молекулярним розміром. Вперше комплексно оцінено внесок різних механізмів адсорбції, зокрема ролі електростатичної взаємодії для катіонних форм та факторів стеричного утруднення для об'ємних аніонних молекул у процесі їх закріплення на активних центрах бентоніту. Отримані дані науково обґрунтовують доцільність інтеграції природного бентоніту в технологічні схеми локальних очисних споруд як ефективного та бюджетного адсорбенту для глибокого очищення стічних вод складного складу від органічних забруднювачів.

Ключові слова: природний бентоніт, адсорбція, органічні барвники, метиленовий синій, кристалічний фіолетовий, конго червоний, ізотерма сорбції, механізм взаємодії, очищення стічних вод.

Kychkyruk Olha Yuriivna Candidate of Chemical Sciences (Ph. D.), an associate professor, an associate professor of the Chemistry department, Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, <https://orcid.org/0000-0002-0558-1647>

Vilenskii Volodymyr Oleksiiovych Doctor of Chemical Sciences, professor, professor of the Chemistry department, Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, <https://orcid.org/0009-0007-3249-9423>

Svyrydiuk Kateryna Petrivna Assistant of the Chemistry department, Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, <https://orcid.org/0009-0000-1258-7644>

SORPTION REMOVAL OF ORGANIC DYES BY NATURAL BENTONITE

Abstract. The relevance of this study is driven by the increasing anthropogenic pressure on aquatic ecosystems resulting from the discharge of wastewater from the textile, chemical, and printing industries containing persistent organic dyes. The high toxicity, carcinogenicity, and bioaccumulative potential of these compounds necessitate the development of highly efficient and economically accessible water treatment methods. Natural clay minerals, particularly bentonites, are considered a promising alternative to expensive synthetic sorbents due to their unique layered structure, high specific surface area, and ion-exchange capacity.

This paper presents the results of a comprehensive study on the sorption properties of natural bentonite toward various classes of organic dyes: methylene blue (MB), crystal violet (CV), and congo red (CR). The kinetic features of the process were investigated, and the influence of phase contact time on the efficiency of pollutant removal from aqueous solutions was established. It was determined that

sorption equilibrium is reached within the first 60–90 minutes, depending on the nature of the adsorbate. Based on the constructed adsorption isotherms, a quantitative assessment of the maximum sorption capacity of the mineral for each investigated dye was performed, allowing for the classification of bentonite as a highly efficient matrix material.

The scientific novelty of the work lies in a comparative analysis of the effectiveness of natural bentonite regarding dyes with different ionic types and molecular sizes. For the first time, a comprehensive evaluation of the contribution of various adsorption mechanisms was conducted, specifically the roles of electrostatic interaction for cationic forms and steric hindrance factors for bulky anionic molecules during their fixation onto the active sites of bentonite. The obtained data scientifically justify the feasibility of integrating natural bentonite into the technological schemes of local treatment plants as an effective and budget-friendly adsorbent for the advanced treatment of complex-composition wastewater from organic pollutants.

Keywords: natural bentonite, adsorption, organic dyes, methylene blue, crystal violet, congo red, adsorption isotherm, interaction mechanism, wastewater treatment.

Постановка проблеми. Проблема забруднення водних ресурсів є однією з найбільш гострих екологічних загроз сучасності, що безпосередньо корелює зі швидким зростанням світового населення та інтенсифікацією промислової діяльності. Необхідність забезпечення сталого доступу до чистої води вимагає пошуку нових, більш ефективних та економічно життєздатних методів очищення стічних вод. Поточний стан справ критичний: згідно з міжнародними звітами, понад 80% світових стічних вод скидається у водойми без будь-якої належної очистки. Ця практика спричиняє негативні наслідки для екосистем, включаючи формування обширних мертвих зон (гіпоксії) у морях та океанах через високе органічне навантаження, що негативно впливає на харчовий цикл і рибну промисловість. Відповідно, пошук дешевих, ефективних та екологічно безпечних технологій очищення є пріоритетним завданням екологічної хімії.

В умовах активного розвитку індустріального сектору, у водні об'єкти регулярно потрапляє значна кількість органічних барвників. Ці сполуки класифікуються як стійкі органічні поллютанти, оскільки вони мають складну ароматичну структуру, демонструючи високу стабільність до фотодеградації, хімічного окиснення та, що найбільш критично, до біологічного розкладу.

Традиційні методи очищення стічних вод, такі як коагуляція, флотація або біологічна деградація, часто виявляються недостатньо ефективними або економічно не вигідними для повного видалення стійких барвників. Це пояснюється тим, що барвники не вилучаються з води механічно і не нейтралізуються повністю під час біологічного очищення. Наявність навіть

низьких концентрацій барвників у воді створює серйозну екологічну загрозу: вони зменшують проникнення сонячного світла, перешкоджаючи фотосинтезу водних рослин, знижують рівень розчиненого кисню та мають токсичні, мутагенні або канцерогенні властивості для водної флори, фауни та людини. У зв'язку з цим, проблема ефективного видалення органічних барвників вимагає впровадження спеціалізованих технологій доочищення, які здатні ізолювати або зруйнувати ці стійкі молекули [1-2].

Серед існуючих фізичних та хімічних методів очищення (включаючи мембранні технології, озонування, фотокаталіз), адсорбція визнається найбільш ефективним та економічно вигідним процесом для видалення барвників та пігментів з водних розчинів. Адсорбційні методи набувають особливої актуальності завдяки своїй операційній простоті, відносній доступності та високій ефективності, особливо при обробці великих об'ємів забрудненої води [3].

Пріоритетним напрямком досліджень є використання природних мінеральних глин, зокрема бентонітів та цеолітів. Ці матеріали є привабливими завдяки їхній низькій вартості, екологічній безпеці, широкій доступності та, у випадку бентоніту, унікальним фізико-хімічним характеристикам. Бентонітова глина, яка складається переважно з мінералу монтморилоніту, має високу пористість, значну питому поверхню та виражену іонно-обмінну здатність, що робить її ефективною у процесах сорбції органічних речовин.

Дослідження сорбційних властивостей природного бентоніту є важливим кроком до розробки екологічно чистих та економічно ефективних систем водоочищення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема очищення стічних вод від синтетичних барвників перебуває у центрі уваги наукової спільноти протягом останніх десятиліть. Сучасні дослідження акцентують увагу на пошуку адсорбентів, що поєднують високу ємність, низьку вартість та екологічну безпеку.

Велика кількість робіт присвячена вивченню мінеральних сорбентів, серед яких бентоніт посідає провідне місце. Завдяки високому вмісту монтморилоніту, бентонітові глини мають високу катіонообмінну ємність, що робить їх надзвичайно ефективними щодо катіонних барвників, таких як метиленовий синій та кристалічний фіолетовий [4-6].

У публікаціях останніх років активно обговорюються механізми взаємодії в системі «сорбент–сорбат». Дослідники зазначають, що адсорбція на бентоніті зазвичай описується моделями Ленгмюра та Фрейндліха, що вказує на поєднання моношарового покриття та неоднорідності енергетичних центрів поверхні. Проте питання видалення аніонних барвників (наприклад, конго червоного) залишається дискусійним, оскільки їхня взаємодія з негативно

зарядженою поверхнею бентоніту обмежена електростатичним відштовхуванням.

Незважаючи на значну кількість даних, більшість робіт зосереджена на дослідженні окремих типів барвників або модифікованих форм бентоніту (органобентонітів). Водночас порівняльні дослідження ефективності саме природного (немодифікованого) бентоніту щодо сполук з різною іонною природою та просторовою конфігурацією молекул представлені недостатньо. Зокрема, потребує уточнення роль стеричного фактора (розміру молекул) у процесах дифузії барвників у міжшаровий простір мінералу [7].

У світовій практиці значна увага приділяється порівняльній ефективності різних типів глин. Так, у роботах [8-9] підкреслюється, що природний бентоніт є одним із найефективніших "low-cost" сорбентів для катіонних барвників. Проте, як зазначають автори [10] швидкість досягнення рівноваги суттєво залежить від дифузійних обмежень, зумовлених розміром молекул сорбату.

Мета статті полягає у визначенні кінетичних та рівноважних характеристик сорбції органічних барвників природним бентонітом, встановленні максимальної сорбційної ємності мінералу та науковому обґрунтуванні механізмів їх взаємодії (електростатичних та стеричних) для оцінки перспективності використання бентоніту в технологіях очищення стічних вод.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження слугував природний бентоніт Тушинського родовища, Україна. Перед використанням мінерал піддавали підготовці: подрібнювали, просіювали крізь сито для одержання фракції з розміром частинок 0,1 мм. Висушували при температурі 105–110°C до постійної маси. Основним породоутворюючим мінералом обраного зразка є монтморилоніт, що зумовлює високу питому поверхню та негативний заряд шарів.

Для моделювання забруднення було обрано три органічні барвники різних класів, що відрізняються за іонною природою та молекулярною масою (табл. 1).

Таблиця 1

Фізико-хімічні характеристики модельних барвників

Барвник	Тип	Хімічний клас	$\lambda_{\max}$, нм
Метиленовий синій (МС)	Катіонний	Тіазиновий	670
Кристалічний фіолетовий (КФ)	Катіонний	Трифенілметановий	540
Конго червоний (КЧ)	Аніонний	Діазобарвник	490

Вибір об'єктів обумовлений їхньою високою токсичністю та екологічною стійкістю. МС та КФ у розчинах дисоціюють з утворенням позитивно заряджених іонів, що сприяє їх взаємодії з негативними центрами бентоніту. Конго червоний, навпаки, є об'ємним аніоном, що створює стеричні перешкоди та електростатичне відштовхування, дозволяючи оцінити межі ефективності природного мінералу.

Токсичність та стійкість таких барвників слугує прямим обґрунтуванням необхідності їхнього ефективного вилучення.

Метиленовий синій є токсичною, канцерогенною та небіорозкладною сполукою. Його присутність у воді, навіть при низьких концентраціях, може викликати ціаноз, некроз тканин та прискорене серцебиття у людей. Крім того, МС інгібує ріст водних рослин і знижує вміст пігментів у мікроводоростях.

Кристалічний фіолетовий є високотоксичним барвником. Його гостра токсичність та складна структура забезпечує довготривале перебування у навколишньому середовищі, спричиняючи подразнення шкіри та очей, а у важких випадках — ниркову недостатність.

Найбільша небезпека КЧ полягає в його здатності до хімічного відновлення азозв'язків, що може призводити до утворення канцерогенного метаболіту — бензидину. Через цей ризик використання цього барвника обмежено або заборонено в багатьох юрисдикціях.

Дослідження сорбції проводили у статичних умовах при кімнатній температурі (20°C). Для статистичної достовірності експерименти проводили у 3-кратній повторюваності. Робочі розчини барвників готували зі стандартних розчинів з початковою концентрацією 50 мг/мл шляхом розведення водою з метою одержання робочих розчинів із вмістом барвників в діапазоні 2 - 8 мг/л.

Для вивчення кінетики до наважок бентоніту масою 0,03 г зважували на вагах ТВЕ «Техноваги» з точністю до другого знаку додавали 25 мл розчину барвника з початковою концентрацією 4 мг/л. Суміш перемішували з використанням механічного перемішувача ЛАБ-ПУ-02 протягом різного часу через 5, 10, 30, 60 та 90 хв.

Після завершення контакту фази розділяли центрифугуванням (3000 об/хв протягом 10 хв). Залишкову концентрацію барвників у центрифугаті визначали фотоколориметричним методом за допомогою фотоколориметра КФК-2 при відповідних $\lambda_{\max}$ із використанням калібрувальних графіків. Умови вимірювань: товщина кювети 20 мм, дистильована вода використовувалася у якості розчину порівняння. Для побудови ізотерм сорбції наважки бентоніту контактували з розчинами барвників у діапазоні концентрацій 2, 4, 6 та 8 мг/л до встановлення рівноваги. За результатами початкових і рівноважних концентрацій барвників у модельних розчинах розраховували ступінь сорбції та сорбційну ємність бентоніту щодо досліджуваних барвників.

Кінетичні дослідження підтвердили високу швидкість адсорбції для катіонних барвників. Для метиленового синього зафіксовано найвищу швидкість сорбції: вже за перші 5 хвилин контакту ступінь вилучення склав 71,03%, досягаючи максимуму на 60-й хвилині експерименту. Така висока ефективність пояснюється інтенсивною електростатичною взаємодією між позитивно зарядженими іонами МС та негативно зарядженими активними центрами на поверхні монтморилоніту (основної фази бентоніту). Кристалічний фіолетовий продемонстрував подібну тенденцію, проте з дещо меншою швидкістю дифузії, що може бути пов'язано з його більшим молярним об'ємом порівняно з МС. Процес вилучення конго червоного характеризувався значно нижчими показниками. Ступінь вилучення за 30 хвилин склав лише 24,44%.

Така низька ефективність зумовлена, з одного боку, стеричним фактором та з іншого боку електростатичним відштовхуванням. Аніонна природа КЧ призводить до відштовхування молекул від одноіменно зарядженої поверхні бентоніту, також велика молекулярна маса (696,66 г/моль) та лінійна структура конго червоного ускладнюють його дифузію в міжшаровий простір мінералу.

Встановлення динамічної рівноваги у досліджуваних системах протягом 90 хвилин свідчить про високу реакційну здатність природного бентоніту. Швидке досягнення рівноважного стану (особливо для катіонних форм) є критично важливим параметром для проектування промислових адсорбційних колон, оскільки дозволяє мінімізувати час перебування стічних вод у реакторі.

Порівняльний аналіз показав, що природний бентоніт виявляє виражену селективність до катіонних барвників. Це дозволяє класифікувати його як ефективний матричний матеріал для вилучення полютантів тіазинового та трифенілметанового рядів. Ізотерми адсорбції барвників зображено на рис. 1-3.

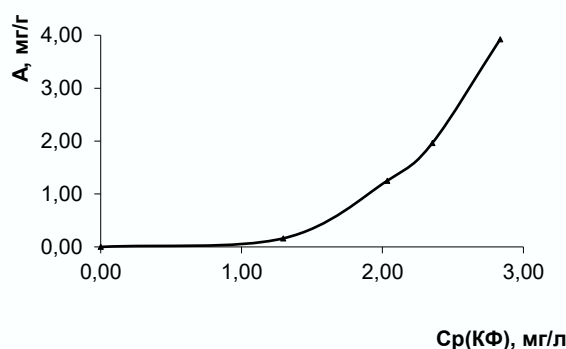


Рис. 1. Ізотерма адсорбції кристалічного фіолетового на бентоніті

Отримана ізотерма кристалічного фіолетового має S-подібний характер (тип за класифікацією Гіллса), що вказує на складний механізм взаємодії.

Початкова ділянка графіка характеризується низьким ступенем вилучення при малих концентраціях, що може бути пов'язано з конкуренцією молекул барвника з молекулами розчинника за активні центри. Згідно з розрахунками, ефективність процесу суттєво зростає з насиченням системи: від мінімального значення 12,95 % при низьких концентраціях до 62,41 % при максимальному навантаженні. Оскільки КФ є катіонним барвником, основну роль відіграє електростатичне притягання між позитивно зарядженими іонами барвника та негативно зарядженими силікатними шарами бентоніту. Стрімкий підйом кривої на графіку також вказує на можливість утворення полімолекулярних шарів або агрегатів барвника на поверхні мінералу при високих концентраціях.

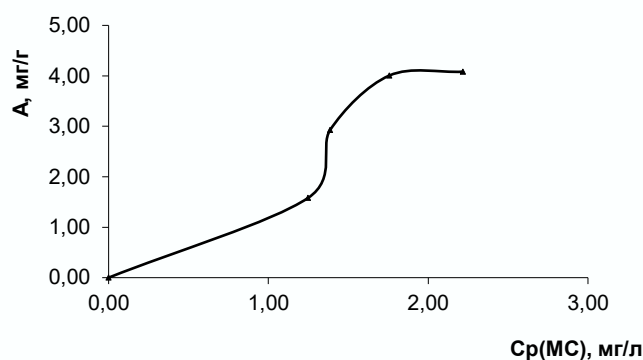


Рис. 2. Ізотерма адсорбції метиленового синього на бентоніті

Графік для МС має вигляд класичної L-подібної ізотерми з переходом у плато при високих концентраціях. Спостерігається стрімке зростання адсорбційної ємності на початковій ділянці, що свідчить про високу спорідненість катіонів МС до активних центрів бентоніту. При рівноважній концентрації близько 1,76–2,22 мг/л крива виходить на плато, що відповідає максимальному заповненню доступних сорбційних центрів (адсорбція складає 1,76–2,22 мг/г). Ступінь вилучення залишається стабільно високим (68,83–73,24 %).

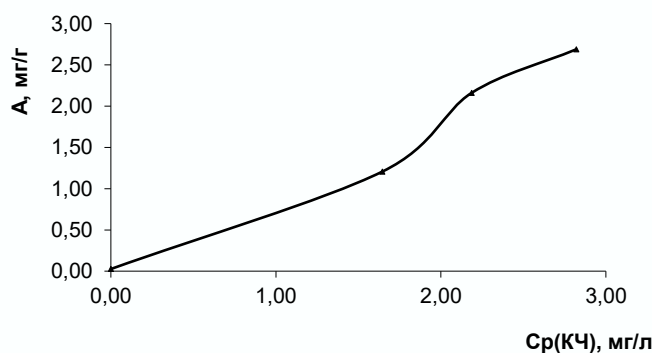


Рис. 3. Ізотерма адсорбції конго червоного на бентоніті

Ізотерма сорбції аніонного барвника КЧ демонструє лінійний характер з тенденцією до поступового насичення. Попри аніонну природу, бентоніт демонструє здатність вилучати КЧ, хоча ступінь сорбції є нестабільним. При низьких концентраціях вилучення майже відсутнє (1,86 %), але зростає до 47,89 % при підвищенні концентрації. Максимальна зафіксована адсорбція складає 3,95 мг/г при $C_p = 3,95$ мг/л. Це вказує на те, що основний внесок у вилучення КЧ вносить не електростатична взаємодія, а фізичне захоплення великих молекул у порах мінералу.

Таблиця 2

**Порівняльна характеристика сорбційної здатності
бентоніту щодо досліджуваних барвників**

Показник	Метиленовий синій (МС)	Кристалічний фіолетовий (КФ)	Конго червоний (КЧ)
Тип	Катіонний	Катіонний	Аніонний
Максимальна адсорбційна ємність A , мг/г	4,11	3,95	2,69
Максимальна адсорбційна ємність A , ммоль/г	0,013	0,007	0,004
Максимальний ступінь сорбції, %	73,24	62,41	47,89
Характер ізотерми	L-тип (Ленгмюрівський)	S-тип (Кооперативний)	Лінійний / Перехідний
Домінуючий механізм	Електростатичне притягання	Міжмолекулярна асоціація	Фізична сорбція в порах

Порівняння максимальної сорбційної ємності A (мг/г та ммоль/г) та ступеня сорбції (%) для досліджуваних барвників узагальнює висновки щодо домінуючих механізмів адсорбції (Табл. 2).

Хоча значення сорбційної ємності (мг/г) для КФ та КЧ у максимальних точках виглядають вищими, метиленовий синій демонструє найвищу ефективність вилучення у відсотковому відношенні — до 73,24%. Це свідчить про те, що бентоніт найбільш споріднений саме до МС, тоді як для КФ та КЧ висока

ємність досягається лише за умови створення значного надлишку барвника у розчині.

Висновки. Бентоніт є одним із найважливіших представників природних мінеральних сорбентів, який широко використовується через його доступність та низьку вартість. Основною складовою бентоніту є мінерал монтморилоніт, який має шарувату структуру. Ключовою особливістю монтморилоніту є наявність постійного негативного заряду на його поверхні. Цей заряд виникає внаслідок ізоморфного заміщення — заміни іонів Si^{4+} на Al^{3+} у тетраедричному шарі або Al^{3+} на Mg^{2+} в октаедричному шарі. Цей негативний заряд обумовлює високу катіонообмінну здатність глини та її значну спорідненість до позитивно заряджених адсорбатів, що пояснюється сильним кулонівським притяганням між позитивно зарядженими іонами барвників та постійним негативним зарядом на поверхні глинистого мінералу. Це підтверджує високу ефективність бентоніту щодо катіонних барвників, таких як метиленовий синій та кристалічний фіолетовий, при цьому низька сорбційна ємність щодо конго червоного пояснюється силами кулонівського відштовхування між негативно зарядженими аніонами барвника та аніонною поверхнею бентоніту.

Показано, що ефективність адсорбції критично залежить від хімічної природи барвника.

Виявлено, що для катіонних барвників, поряд із електростатикою, ключовим лімітуючим фактором є молекулярний розмір. Порівняльний аналіз молярної ємності підтвердив, що більші молекули кристалічного фіолетового зазнають стеричних утруднень при дифузії до внутрішніх активних центрів пор бентоніту, що призводить до двократної різниці порівняно з метиленовим синім, незважаючи на близьку масову ємність.

Експериментальні дані показали, що хоча масова сорбційна ємність для обох катіонних барвників є схожою (4,11 мг/г для МС і 3,95 мг/г для КФ), молярна ємність суттєво відрізняється: 0,013 ммоль/г та лише 0,007 ммоль/г відповідно для МС та КФ. Ця подвійна різниця у молярній ємності є критично важливим показником. Оскільки молярна ємність відображає кількість адсорбованих молекул, а не їхню загальну масу, вона прямо вказує на те, що більший розмір молекули КФ створює стеричні перешкоди. Ці перешкоди обмежують дифузію молекул КФ у внутрішні пори та міжшаровий простір бентоніту, знижуючи кількість активних центрів, які вони можуть зайняти, порівняно з меншими молекулами метиленового синього.

Визначення цієї значної різниці між масовою та молярною ємністю є фундаментальним для розуміння механізмів адсорбції на глинах. Воно підтверджує, що при моделюванні процесів очищення необхідно враховувати не лише хімічну спорідненість (заряд), але й дифузійні та геометричні параметри молекули адсорбату.

Низька ефективність вилучення аніонного конго червоного через кулонівське відштовхування, є прямою індикацією для необхідності подальших досліджень з хімічної модифікації бентоніту. Зміна поверхневого заряду може значно розширити спектр застосування цього природного сорбенту для обробки стоків, що містять аніонні поллютанти.

Адсорбція барвників на природному бентоніті є відносно швидким процесом, досягаючи рівноваги протягом, що є сприятливим показником для його практичного застосування.

Література:

1. Yagub M. T., Sen T. K., Afroze Sh., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2014.Vol. 209. P. 172-184 <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
2. Леськів Г. З. Очищення стічних вод від барвників шляхом адсорбції на природних дисперсних сорбентах: дис. ... кандидата технічних наук : 21.06.01 Львів : Національний університет "Львівська політехніка", 2008. 123 с.
3. Javed I., Nasser Al-Sabahi J., Nadeem F., Jilani M. I. Adsorption of dyes through bentonite and zeolite based composite materials – A comprehensive review. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. 2018.13. P. 58-69 <https://iscientific.org/wp-content/uploads/2020/05/10-IJCBS-18-13-10.pdf>
4. Співак В. В., Бабчук М. М., Астрелін І. М., Алексєєв О. Ф. Українські дисперсні мінерали в процесах очищення стічних вод. Тези доповідей II-й Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. (23-26 вересня 2009 року). Вінниця, 2009. С.52-55
5. Gupta V. K. Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Managem.* 2009. №7. P.2313-2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
6. Петрушка І. М., Руда М. В., Гивлюд А. М., Петрушка К. І. Екологічна безпека поводження з токсичним водним середовищем. Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції «Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг». Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2019. С. 208-209
7. Kochubei V., Yaremchuk Y., Yaholnyk S., Malovanyu M. Study of the influence of ultrasonic waves on the sorption capacity of enriched bentonite of the cherkasy deposit in relation to Copper ions. *Chem. Chem. Technol.*, 2025. Chemistry. Vol. 19(3). P. 425–433. <https://doi.org/10.23939/chcht19.03.425>
8. Kyzas G. Z., Matis K. A. Nano-adsorbents for pollutants removal: a review. *Journal of Molecular Liquids*. 2015. 203. P. 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.01.004>
9. Kyzas G. Z., Lazaridis N. K., Mitropoulos A. C. Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach. *Chemical engineering journal*. 2012. 189. P. 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.045>
10. Ho Y. S., Ng J. C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review. *Separation and Purification Methods*. 2000. Vol. 29(2). P. 189-232. <https://doi.org/10.1081/SPM-100100009>
11. Fernandes J. V., Rodrigues A. M., Menezes R. R., Gelmires de Araújo. Adsorption of Anionic Dye on the Acid-Functionalized Bentonite. *Neves Materials (Basel)*. 2020 13(16) : 3600. <https://doi.org/10.3390/ma13163600>

References:

1. Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
2. Leskiv, H. Z. (2008). *Ochyshchennia stichnykh vod vid barbnikiv shliakhom adsorbtsii na pryrodnykh dyspersnykh sorbentakh* [Wastewater treatment from dyes by adsorption on natural dispersed sorbents] (Doctoral dissertation, Lviv Polytechnic National University) [in Ukrainian].
3. Javed, I., Nasser Al-Sabahi, J., Nadeem, F., & Jilani, M. I. (2018). Adsorption of dyes through bentonite and zeolite based composite materials – A comprehensive review. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 13, 58-69.
4. Spivak, V. V., Babchuk, M. M., Astrelin, I. M., & Alekseev, O. F. (2009). Ukrainski dyspersni mineraly v protsesakh ochyshchennia stichnykh vod [Ukrainian dispersed minerals in wastewater treatment processes]. *Abstracts of the II All-Ukrainian Congress of Ecologists with International Participation* (pp. 52-55). Vinnytsia [in Ukrainian].
5. Gupta, V. K. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90(7), 2313-2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
6. Petrushka, I. M., Ruda, M. V., Hyvliud, A. M., & Petrushka, K. I. (2019). Ekolohichna bezpeka povodzhennia z toksychnym vodnym seredovyshchem [Environmental safety of handling a toxic aquatic environment]. *Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference "Water Supply and Wastewater Disposal: Design, Construction, Operation, Monitoring"* (pp. 208-209). Lviv Polytechnic Publishing House [in Ukrainian].
7. Kochubei, V., Yaremchuk, Y., Yaholnyk, S., & Malovanyy, M. (2025). Study of the influence of ultrasonic waves on the sorption capacity of enriched bentonite of the Cherkasy deposit in relation to Copper ions. *Chemistry & Chemical Technology*, 19(3), 425–433. <https://doi.org/10.23939/chcht19.03.425>
8. Kyzas, G. Z., & Matis, K. A. (2015). Nanoadsorbents for pollutants removal: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 203, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.01.004>
9. Kyzas, G. Z., Lazaridis, N. K., & Mitropoulos, A. C. (2012). Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach. *Chemical Engineering Journal*, 189, 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.045>
10. Ho, Y. S., Ng, J. C. Y., & McKay, G. (2000). Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: Review. *Separation and Purification Methods*, 29(2), 189-232. <https://doi.org/10.1081/SPM-100100009>
11. Fernandes, J. V., Rodrigues, A. M., Menezes, R. R., & Neves, G. A. (2020). Adsorption of anionic dye on the acid-functionalized bentonite. *Materials*, 13(16), 3600. <https://doi.org/10.3390/ma13163600>