



Б. Я. Бойчук

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ СПОСОБІВ МІКРОХВИЛЬОВОЇ АКТИВАЦІЇ БЕНТОНІТУ У ПРОЦЕСІ ОЧИЩЕННЯ НИМ СТІЧНИХ ВОД ВІД НАДЛИШКУ ФОСФАТІВ

Досліджено можливості зменшення вмісту фосфатів у скидах стічних вод прибережних населених пунктів малих річок шляхом сорбційного очищення. Для прикладу обрано верхню течію річки Прут в околицях міста Яремче (Івано-Франківська обл., Україна). Підтверджено раніше опубліковані дані автора статті та інших дослідників про те, що у річковій воді на вказаній ділянці збільшилась кількість забруднювачів, зокрема сполук фосфору. Показано, що значний вплив на цей факт мають не повністю очищені стічні води санаторіїв та інших рекреаційних закладів міста Яремче, які містять надлишок фосфат-іонів. На підставі власних попередніх досліджень та теперішньої роботи запропоновано вилучати ці іони за допомогою природного сорбенту бентоніту, активованого мікрохвилями у різні способи. Один з них – опромінення бентоніту мікрохвилями у чистій воді, видалення цієї промивної води, а тоді внесення активованого у такий спосіб бентоніту у стічну воду. Цей спосіб названо "стимуляція". Другий спосіб – безпосереднє внесення необробленого (нативного) бентоніту у стічну воду, а мікрохвильовому опроміненню піддається вже приготовлена суспензія. Такий спосіб названо "пряме опромінення". Показано, що мікрохвильова активація бентоніту в обох випадках збільшує коефіцієнт вилучення фосфат-іонів із стічних вод у декілька разів, порівняно з нативним бентонітом. Виявлено, що у лабораторних умовах "пряме опромінення" дає кращі результати щодо ступеня вилучення фосфат-іонів, відносно способу "стимуляції". Показано, що у промислових масштабах здійснити "пряме опромінення" суспензії бентоніту досить складно. Подано обґрунтовану пропозицію використовувати спосіб "стимуляції" бентоніту для вилучення надлишку фосфатів із стічних вод на реально працюючих очисних спорудах.

Ключові слова: стічні води; фосфати; адсорбція; бентоніт; мікрохвилі.

Вступ / Introduction

Головною водною артерією Карпатського національного природного парку є річка Прут – ліва притока Дунаю. Упродовж останніх років викликає занепокоєння зростання вмісту біогенних забруднювачів у її верхній течії, зокрема, в околицях м. Яремче (Івано-Франківська обл., Україна). Особливе це стосується зростання вмісту у річковій воді сполук фосфору [2, 3, 6]. Причини такого явища до кінця не вивчені, тому кожне наукове дослідження в цьому напрямі є актуальним.

Як відомо, основним джерелом забруднення водою, що призводить до погіршення якості води, є скиди недостатньо очищених стічних вод. На жаль, Україна потерпає від того, що понад 90 % діючих спеціалізованих каналізаційно-очисних споруд (КОС) не забезпечують необхідний рівень очищення за деякими компонентами [5, 14].

Також не варто забувати про велику кількість санаторіїв, будинків відпочинку та інших рекреаційних закладів, яких з кожним роком на мальовничих берегах Прута з'являється щораз більше. У більшості з цих будівель є очисні споруди, але динаміка розвитку житлових і відпочинкових поселень переважає над природною здатністю річки до самоочищення.

Саме тому загальним завданням цієї роботи є пошук ефективних способів доочищення стічних вод прибережних рекреаційних закладів від надлишку фосфат-іонів. У цьому плані за останні роки дедалі частіше використовується очищення згаданих вод доступними, дешевими природними сорбентами.

Об'єкти дослідження – стічні води трьох рекреаційних закладів м. Яремче та природний сорбент бентоніт.

Предмет дослідження – сорбційні процеси за участі бентоніту, який було піддано мікрохвильовому опроміненню різними способами.

Мета роботи – провести порівняльний аналіз ефективності різних варіантів мікрохвильової активації бентоніту для оптимізації процесів очищення стічних вод від надлишку фосфатів.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі *основні завдання дослідження*: провести активацію зразків бентоніту різними способами; здійснити сорбційне очищення бентонітом проб стічних вод декількох рекреаційних закладів м. Яремче; визначити вміст фосфат-іонів у пробах до та після сорбційного очищення; за отриманими результатами оцінити ступінь вилучення фосфат-іонів у різних варіантах активації бентоніту.

Інформація про автора:

Бойчук Богдан Ярославович, підполковник служби цивільного захисту, начальник курсу інституту пожежної та техногенної безпеки ЛДУ БЖД. Email: komandos2703@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-4343-8822>

Цитування за ДСТУ: Бойчук Б. Я. Порівняння ефективності різних способів мікрохвильової активації бентоніту у процесі очищення ним стічних вод від надлишку фосфатів. Науковий вісник НЛТУ України. 2022, т. 32, № 2. С. 45–49.

Citation APA: Boichuk, B. Ya. (2022). Comparison of efficiency of different methods of microwave activation of bentonite in the process of its treatment of wastewater from phosphate excess. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(2), 45–49. <https://doi.org/10.36930/40320207>

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У попередніх дослідженнях (2019-2021 рр.) [2, 3 та ін.] автор повідомляв, що абсолютна більшість максимумів забруднення фосфатами проб води з р. Прут у верхній течії припадала на м. Яремче (бл. 0,38 мг/дм³) [3].

З дозволу керівництва ДП "Яремчеводоканал", автор ознайомився з протоколами дослідження очищених стічних вод цього підприємства за 2017-2019 роки. Там зафіксовано перевищення вмісту фосфатів у стічних водах після основного циклу очищення (0,19 ... 0,26 мг/дм³).

Проблема видалення сполук фосфору із стічних вод на сьогодні не має оптимального вирішення. Окреме місце у цьому напрямі відводять застосуванню природних глинистих матеріалів (зокрема бентоніту), як дешевих, але ефективних сорбентів. Загальну формулу цих мінералів можна подати в такому вигляді



де MeO_k – оксиди металів (заліза, лужних і лужноземельних металів та ін.). За хімічною природою та фазовим складом бентоніти є композиціями алюмосилікатних мінералів: монтморилоніту, кварцу, гідрослюди, хлориту тощо [13].

Глинисті сорбенти використовують як напряму, так і після хімічного модифікування або активації. За останні десятиліття перспективним напрямом підвищення ефективності роботи сорбентів є використання для їх активації надвисокочастотного електромагнітного випромінювання (НВЧ ЕМВ, або мікрохвиль) [4, 9, 10].

Автори [7, 8] показали, що опромінений мікрохвилями у різні способи бентоніт значно краще сорбує фосфат-іони, ніж необроблений (нативний) сорбент. Однак ці дослідження проводили на модельних (чистих) розчинах фосфатних сполук.

Матеріали і методи дослідження. Як зазначено вище, об'єктами дослідження були проби стічних вод різних рекреаційних закладів.

Перша проба – частково очищені стічні води санаторію "Ведмежа гора" (м. Яремче); друга проба – частково очищені стічні води спа-готелю "Романтик" (там же); третя проба – неочищені стічні води міні-готелю "Гірська роса" у тому самому місті. Далі ці проби будемо позначати скорочено: "№ 1" ("Ведмежа гора"); "№ 2" ("Романтик"); "міні" ("Гірська роса").

Адсорбційному очищенню бентонітом піддавали профільтовані проби згаданих стічних вод, а також додаткові зразки. Останні отримано у спосіб покровоного розбавлення нативних проб водопровідною водою. Метою такого додаткового дослідження було встановити, як може впливати у реальних умовах розбавлення стічних вод звичайною водою на ступінь вилучення з них фосфатів з використанням бентоніту. Окрім цього, вивчали залежність ступеня вилучення фосфатів із стічних вод від кислотності (рН) середовища.

Визначення вмісту фосфатів у нативних і додаткових (розбавлених) пробах стічних вод до та після сорбційного очищення їх бентонітом виконували фотометричним методом [1] з використанням концентраційного електрофотокolorиметра КФК-2.

Перед вивченням сорбційної здатності бентоніту перевіряли його чистоту. Зокрема, отримано дифрактограму нативного зразка бентоніту (без жодного оброблення; дифрактометр ДРОН-3.0, мідне відфільтроване випромінювання, $\theta/2\theta$ -сканування), за якою за допомогою рентгенофазового аналізу (РФА) [12] було ідентифіковано основні мінералогічні фази.

Підготовка сорбенту здійснювали трьома способами (серіями): бентоніт без оброблення (нативний, або "нат"), промитий дистильованою водою під опроміненням ("стимульований", або "стим") та опромінений безпосередньо в досліджуваному розчині ("прямого опромінення", або "DIR"). Для опромінення використовували звичайну побутову мікрохвильову піч.

Спочатку у всіх серіях у склянки місткістю 150 мл поміщали по 1,0 г бентоніту. Далі, у серіях "нат" і "DIR" у склянки з сорбентом додавали по 100 мл відповідних проб стічних вод, а у серії "стим" – по 30 мл дистильованої води.

У серії "нат" отримані суспензії перемішували та залишали для відстоювання. У серії "стим" колби із суспензіями бентоніту у дистильованій воді опромінювали мікрохвилями та відстоювали. Потім промивну воду видаляли, заливали отриманий "стимульований" сорбент пробою стічної води (100 мл), перемішували та залишали для відстоювання. У серії "DIR" суспензію нативного бентоніту у стічній воді одразу опромінювали мікрохвилями, перемішували та залишали для відстоювання. У всіх трьох серіях після відстоювання суспензій з них відбирали близько 70-80 мл прозорої частини розчину та передавали на наступний етап – визначення вмісту фосфатів.

Опрацювання експериментальних даних для побудови графіків і розрахунку ступеня вилучення фосфат-іонів виконували методами математичної статистики та регресійного аналізу. Використовували стандартні можливості пакету загальновідомих офісних програм Microsoft Office. Повний комплекс експериментальних досліджень у межах цієї роботи проводили у НДЛ екологічної безпеки ЛДУ БЖД.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Фазовий аналіз. Рентгенофазовим аналізом дифрактограми нативного зразка бентоніту встановлено, що у його складі містяться 3 мінерали у приблизно однакових кількостях: монтморилоніт (бл. 33 % ат.); гідрослюда (бл. 29 % ат.); кварц (бл. 27 % ат.); серед домішок – хлорит, кальцит, силвініт та інші мінерали (рис. 1).

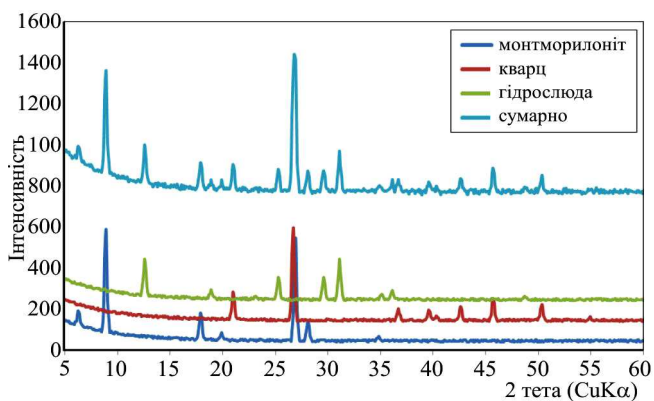


Рис. 1. Результати рентгенофазового аналізу дифрактограми нативного зразка бентоніту (CuK_α – випр.) / The results of X-ray phase analysis of the diffraction pattern of native sample bentonite (CuK_α – rad.)

Сорбційні дослідження. Початкові концентрації фосфат-іонів у відібраних пробах стічних вод становили

ли: 0,33 мг/дм³ (проба "№ 1"); 0,22 мг/дм³ (проба "№ 2") та 5,61 мг/дм³ (проба "міні").

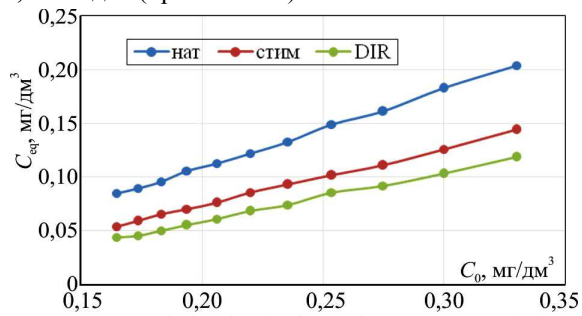


Рис. 2. Концентрації фосфат-іонів у стічних водах до (C_0) та після (C_{eq}) сорбційного очищення бентонітом (проба "№ 1") / Concentrations of phosphate ions in wastewater before (C_0) and after (C_{eq}) sorption purification with bentonite (sample "№ 1")

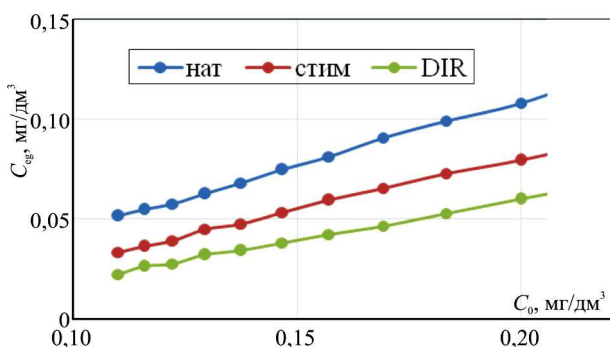


Рис. 3. Концентрації фосфат-іонів у стічних водах до (C_0) та після (C_{eq}) сорбційного очищення бентонітом (проба "№ 2") / Concentrations of phosphate ions in wastewater before (C_0) and after (C_{eq}) sorption purification with bentonite (sample "№ 2")

Таблиця. Ступені вилучення фосфат-іонів із проб стічних вод за різних способів мікрохвильової активації сорбенту / Degrees of extraction of phosphate ions from wastewater samples at different methods of microwave activation of the sorbent

№ серії	Спосіб оброблення сорбенту	Ступінь розбавлення										
		1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
проба "№ 1"												
1	"нат"	0,381	0,390	0,414	0,413	0,436	0,445	0,454	0,455	0,477	0,484	0,484
2	"стим"	0,563	0,581	0,596	0,599	0,606	0,610	0,632	0,638	0,642	0,659	0,673
3	"DIR"	0,641	0,656	0,666	0,663	0,685	0,689	0,703	0,716	0,727	0,738	0,733
проба "№ 2"												
4	"нат"	0,437	0,459	0,458	0,464	0,482	0,490	0,504	0,515	0,527	0,527	0,530
5	"стим"	0,592	0,602	0,602	0,612	0,621	0,636	0,652	0,651	0,678	0,686	0,695
6	"DIR"	0,688	0,700	0,711	0,724	0,729	0,740	0,750	0,752	0,773	0,772	0,797
проба "міні"												
7	"нат"	0,258	0,269	0,288	0,300	0,299	0,303	0,326	0,334	0,330	0,342	0,370
8	"стим"	0,415	0,424	0,437	0,454	0,457	0,462	0,488	0,481	0,493	0,507	0,527
9	"DIR"	0,512	0,529	0,545	0,545	0,553	0,569	0,573	0,598	0,607	0,602	0,611

Вплив кислотності середовища. Початкові значення рН проб нерозбавлених стічних вод "№ 1", "№ 2" та "міні" становили 7,3, 6,4 та 7,8, відповідно. Після додавання відповідних кількостей NaOH або HCl отримано нові робочі проби з іншими значеннями рН, з яких також вилучали фосфат-іони за допомогою бентоніту у серіях "нат", "стим" та "DIR" (рис. 5).

Обговорення результатів дослідження. Як видно з отриманих результатів, "пряме опромінення" бентоніту мікрохвилями в процесі сорбційного очищення ним стічних вод від фосфат-іонів збільшує сорбційні характеристики цього матеріалу у майже 2 рази відносно нативного сорбенту. Спосіб "стимуляції" дає трохи гірші результати, але також значно ефективніший від способу очищення необробленим бентонітом.

Щодо можливого механізму впливу мікрохвиль на процес адсорбції фосфат-іонів бентонітом, і, як наслі-

На рис. 2 зображено графіки зміни концентрацій фосфат-іонів у стічних водах у місці виходу їх з очисних споруд закладу "№ 1". Крайні праві точки на кожному графіку – концентрації фосфатів у нерозбавлених пробах стічних вод до взаємодії їх із сорбентом (C_0) та після сорбційного вилучення фосфатів (C_{eq}) бентонітом – нативним та активованим мікрохвилями у різні способи. Аналогічні залежності для зразків "№ 2" та "міні" наведено на рис. 3 і 4.

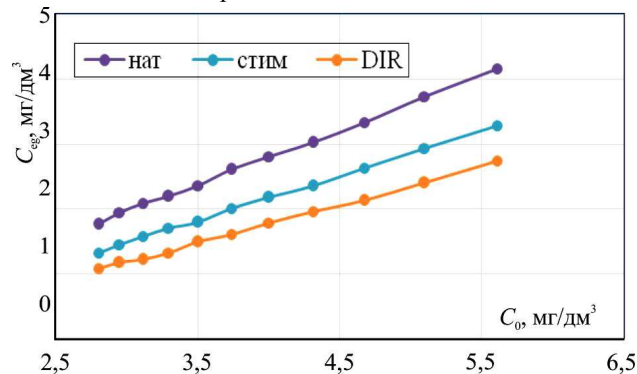


Рис. 4. Концентрації фосфат-іонів у стічних водах до (C_0) та після (C_{eq}) сорбційного очищення бентонітом (проба "міні") / Concentrations of phosphate ions in wastewater before (C_0) and after (C_{eq}) sorption purification with bentonite (sample "mini")

На підставі значень вмісту фосфат-іонів у пробах стічних вод до та після сорбційного очищення їх бентонітом розраховано значення ступенів вилучення цих іонів із згаданих проб (у частках від одиниці; див. таблицю).

док, зростання ступеня вилучення їх зі стічних вод, то можна розглянути такі варіанти.

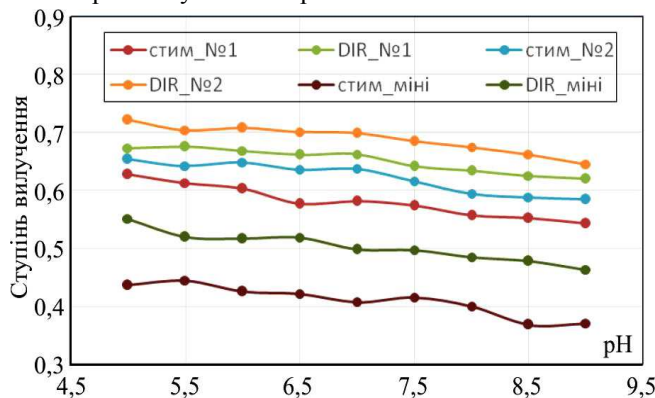


Рис. 5. Зміни ступеня вилучення фосфат-іонів залежно від кислотності середовища / Changes in the degree of extraction of phosphate ions depending on the acidity environment

По-перше, під дією мікрохвиль дипольні молекули води частково руйнують поверхню алюмосилікатних мінералів за рахунок розриву зв'язків у "сіольних" групах $\equiv\text{Si}-\text{OH}$. Це, ймовірно, призводить до збільшення кількості і розмірів мікропор на поверхні сорбенту.

По-друге, біля поверхні сорбенту присутні складні багатофазні композиції: дипольні молекули води, фосфат-, гідроксид-, силікат-іони та іони металів, частково вивільнені з алюмосилікатного каркасу тощо. З такого набору субмолекулярних часток дуже ймовірним є утворення нової мікрокристалічної фази (метафази), адже ціла низка фосфатів металів є важкорозчинними. Мікрохвильове опромінення суспензії (серія "DIR") сприяє цьому процесу, додаючи енергії для подолання активаційного бар'єру і переходу зі стану метафази у початковий мікрозародок кристалу.

Тобто внаслідок такої мікрокристалізації фосфат-іони виводяться з розчину не тільки завдяки "класичній" фізичній адсорбції у вигляді моношару на поверхні мікропор бентоніту, а й завдяки новоутвореним мікрокристалам нерозчинних фосфатів металів (наприклад, алюмінію, кальцію або магнію).

Важливе значення має також ступінь розбавлення вихідних проб стічних вод. Як бачимо з таблиці, внаслідок розбавлення проб ступінь вилучення фосфат-іонів зростає. Очевидно, нерозбавлені (більш концентровані) стічні води містять значну кількість домішок, які не були вилучені у процесах попереднього очищення. Ці домішки можуть забивати мікропори на поверхні бентоніту і зменшують у такий спосіб можливість доступу до них фосфат-іонів.

Щодо впливу кислотності середовища, то з рис. 5 видно, що зі збільшенням рН середовища (слаболужна реакція) ступінь вилучення фосфат-іонів із стічних вод зменшується, а зі зменшенням рН (слабокисла реакція) – відповідно, збільшується.

Така поведінка дослідженого зразка бентоніту цілком узгоджується із загальною теорією хімічної взаємодії алюмосилікатного каркасу основних мінералогічних фаз цього сорбенту (монтморилоніт, хлорит, гідрослюда та ін.) із кислотами та лугами. Зокрема, на прикладі сорбентів-цеолітів [4, 9, 11 та ін.] встановлено, що фосфати краще сорбуються у кислому середовищі.

Щодо утилізації насиченого поліаніонами бентоніту, то він може бути хорошим наповнювачем в'язучих композицій – будівельних розчинів, промислової кераміки, тротуарної плитки тощо.

Отже, доочищення стічних вод бентонітом від надлишку фосфат-іонів після виходу їх із загальних очисних споруд найефективніше можна було б здійснити у спосіб "прямого опромінення". Однак застосувати цей процес у промисловому масштабі (на реальних очисних спорудах) досить складно. Водночас, потужні стаціонарні НВЧ-установки (фактично, великі мікрохвильові печі) уже давно існують. Тому, на думку автора, в умовах реальних очисних споруд варто використовувати спосіб "стимуляції".

Для реалізації процесу певну кількість бентоніту у діелектричному контейнері заливають дистильованою (обезсоленою) водою та помішають у НВЧ-установку. Після декількох циклів опромінення і перемішування контейнер видаляють з установки і залишають для відстоювання. Тривалість опромінення контейнера повинна бути не менше 6 хв (3 цикли по 2 хв), про що пові-

домляли автори [7, 8]. Після відстоювання промивну воду зливають, і "стимульований" у такий спосіб бентоніт готовий до використання. Його можна просто помістити у відстійник із попередньо очищеною стічною водою та здійснити перемішування.

Щодо оптимального часу контакту сорбенту і стічної води, то автори [7, 8] повідомляли, що максимально можливе осадження фосфатів відбувається впродовж 8 год; співвідношення маси сорбенту до маси стічної води становило близько 1:100.

Отже, внаслідок проведеного дослідження отримано такі *основні результати*: проведено порівняльний аналіз ефективності різних варіантів мікрохвильової активації бентоніту для оптимізації процесів очищення стічних вод від надлишку фосфатів.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше досліджено вплив мікрохвильової активації природного сорбенту бентоніту на його здатність сорбувати фосфат-іони із стічних вод. Такі дослідження у науковій літературі не описані, тому їх можна вважати новим напрямом у вивченні процесів сорбційного очищення стічних вод.

Практична значущість результатів дослідження – отримано хороші результати сорбційного вилучення НВЧ-активованим бентонітом надлишку фосфат-іонів із частково очищених та неочищених стічних вод. Такі результати, отримані у лабораторних умовах досліджень, дають підстави сподіватись, що описану методику можна буде із значним ефектом застосувати на практиці – у виробничих процесах реальних КОС прибережних населених пунктів або окремих закладів (зокрема рекреаційних).

Висновки / Conclusions

Запропоновано нові способи покращення якості річкової води шляхом сорбційного вилучення надлишку фосфат-іонів із стічних вод прибережних населених пунктів. Підтверджено опубліковані раніше власні дані та результати інших дослідників про те, що у воді верхньої частини річки Прут в околицях міста Яремче (Івано-Франківська обл., Україна) збільшилась кількість забруднювачів, зокрема сполук фосфору. Показано, що істотний вплив на цей факт мають не повністю очищені стічні води, які містять надлишок фосфат-іонів. Запропоновано вилучати ці іони за допомогою природного сорбенту бентоніту, активованого мікрохвилями у різні способи. Показано, що мікрохвильова активація цього сорбенту збільшує коефіцієнт вилучення фосфат-іонів із стічних вод у декілька разів, порівняно з нативним бентонітом. Запропоновано орієнтовну технологічну схему доочищення стічних вод від надлишку фосфатів після основного (стандартного) циклу очищення. Обґрунтовано вибір варіанта "стимуляції" для мікрохвильової активації бентоніту, як найефективнішого у роботі реальних очисних споруд.

Подяка. Автор статті висловлює подяку керівництву ДП "Яремчеводоканал" за можливість ознайомитись з протоколами лабораторних досліджень проб очищених стічних вод після виходу їх із міських КОС за попередні роки.

References

1. Bila, T. A., Lyashenko, Ye. V., & Okhrimenko, O. V. (2020). Doslidzhennya vmistu fosfativ u poverkhnevnykh vodakh. *Vodni*

- bioresursy ta akvakultura*, 1, 111–118. [In Ukrainian] <https://doi.org/10.32581/wba.2020.1.10>
2. Boichuk, B. Ya., & Kuzyk, A. D. (2020). Otsinka efektyvnosti roboty ochysnykh sporud mista Yaremche za hidrokhimichnymi pokaznykamy richky Prut. *IV Vseukr. nauk. konf. "Teoretychni ta eksperymentalni aspekty suchasnoyi khimiyi*, Dnipro, 123–126. [In Ukrainian].
 3. Boichuk, B. Ya., Kuzyk, A. D., Sysa, L. V., & Voloshchyshyn, A. I. (2019). Antropohennyi vplyv na osnovni hidrokhimichni parametry richky Prut v okolytsyakh mista Yaremche. *Ekolohichna bezpeka*, 1(27), 50–57. [In Ukrainian].
 4. Foletto, E. L., Paz, D. S., & Gundel, A. (2013). Acid-activation assisted by microwave of a Brazilian bentonite and its activity in the bleaching of soybean oil. *Applied Clay Science*, 83–84, 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.017>.
 5. Khilchevskiy, V. K., Kurylo, S. M., & Sherstyuk, N. P. (2018). Chemical composition of different types of natural waters in Ukraine. *J. Geol. Geograph. Geoecolog*, 27(1), 68–80. <https://doi.org/10.15421/111832>
 6. Kirilyuk, O. V. (2013). Otsinka hidrokhimichnoho statusu vod malykh richok baseynu verkhnoho Prutu (na prykladi richok Hukiv, Dereluy ta Vyzhenka). *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology: scientific collection*, 4(31), 62–67. [In Ukrainian].
 7. Kontsur, A. Z., Dumas, I. Z., & Sysa, L. V. (2018). Ochyshchennya vodnykh system vid nadlyshku fosfativ za dopomohoyu bentonitu, aktyvovanoho nadvysokochastotnym vyprominyuvannam. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(7), 78–82. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.15421/40280717>
 8. Kontsur, A. Z., Karpyak, O. R., & Sysa, L. V. (2016). Osoblyvosti reheneratsiyi bentonitu z vykorystannam nadvysokochastotnoho vyprominyuvannya na prykladi biohennykh ioniv. *Scientific Bulletin of UNFU*, 26(8), 292–298. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.15421/40260845>
 9. Korichi, S., Elias, A., Mefti, A., & Bensmaili, A. (2012). The effect of microwave irradiation and conventional acid activation on the textural properties of smectite: comparative study. *Applied Clay Science*, 59–60, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.01.020>
 10. Legras, B., Polaert, I., Thomas, M., & Estel, L. (2013). About using microwave irradiation in competitive adsorption processes. *Applied Thermal Engineering*, 57(1–2), 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.034>
 11. Matsuska, O. V., Sydoruk, O. V., & Sabadash, V. V. (2014). Adsorbtsiya fosfativ pryrodnyimi ta modyfikovanyimi sorbentamy iz vodnykh rozchyniv. *Scientific Bulletin of S. Z. Gzhys'kyi LSU VMBT*, 16, 3(3), 342–347. [In Ukrainian].
 12. Pecharsky, V. K., & Zavalij, P. Yu. (2005). *Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials*. Springer, USA, 713. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09579-0>.
 13. Ravindra, R. S., Kaneko, S., Endo, T., & Lakshmi, R. T. (2017). Spectroscopic Characterization of Bentonite. *Journal of Lasers, Optics & Photonics*, 4(3), 171–175. <https://doi.org/10.4172/2469-410X.1000171>.
 14. Yatsiuk, M., Nabyvanets, Yu., & Osadcha, N. (2017). Adaptation of Ukrainian water resource assessment to European legislation. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, 5(1), 37–45. <https://doi.org/10.26491/mhwm/67267>.

B. Ya. Boichuk

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

COMPARISON OF EFFICIENCY OF DIFFERENT METHODS OF MICROWAVE ACTIVATION OF BENTONITE IN THE PROCESS OF ITS TREATMENT OF WASTEWATER FROM PHOSPHATE EXCESS

The influence of microwave radiation on the sorption capacity of the natural clay sorbent bentonite in the process of extracting phosphate ions from wastewater has been studied. In the course of research we applied the following issues: the method of X-ray phase analysis of the sorbent was used to determine its purity; microwave irradiation of bentonite for its activation; photometric analysis to determine the content of phosphates in wastewater before and after extraction with a sorbent. The upper reaches of the Prut River near the town of Yaremche (Ivano-Frankivsk Region, Ukraine) were selected for research. The previously published data of the author of the article and other researchers that the amount of pollutants in river water in this area has increased, in particular, phosphorus compounds, have been confirmed. This fact is proved not to be significantly affected by incompletely treated wastewater from sanatoriums and other recreational facilities in the city of Yaremche, which contain excess phosphate ions. Based on his own previous research and current work, the author proposed to remove these ions using the natural sorbent bentonite, activated by microwaves in different ways. The first is microwave irradiation of bentonite in clean water, removal of this wash water, and then introduction of bentonite activated in this way into wastewater ("stimulation"). The second is the direct introduction of untreated (native) bentonite into wastewater and microwave irradiation of the resulting suspension ("direct irradiation"). Microwave activation of bentonite in both cases is shown to increase the coefficient of extraction of phosphate ions from wastewater several times, compared with native bentonite. Sequentially, "direct irradiation" gives better results in laboratory conditions in terms of the degree of removal of phosphate ions, relative to the method of "stimulation". It is shown that it is quite difficult to carry out "direct irradiation" of bentonite suspension on an industrial scale. Therefore, there is a proposal to use the method of "stimulation" of bentonite to remove excess phosphates from wastewater at the actual treatment plants.

Keywords: wastewater; phosphates; adsorption; bentonite; microwaves.