

**А. В. ІВАНЧЕНКО**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри хімічних та біологічних технологій  
Дніпровський державний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-1404-7278

**В. В. ВОРОНОВ**

аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій  
Дніпровський державний технічний університет  
ORCID: 0009-0004-3717-01-31

**Ю. О. СЕРЕДА**

магістр кафедри хімічних та біологічних технологій  
Дніпровський державний технічний університет  
ORCID: 0009-0000-4272-03-97

## АДСОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ФОСФОРУ З РІДКИХ ВІДХОДІВ З УТИЛІЗАЦІЄЮ ОСАДІВ У ДОБРИВА

*Дослідження присвячене вирішенню проблеми вилучення фосфору зі стічних вод, що є надзвичайно актуальною у сучасних умовах зростання антропогенного навантаження на водні ресурси. Надмірне надходження фосфатів у природні водойми спричиняє інтенсивну евтрофікацію, погіршення якості води, зниження біорізноманіття та зростання витрат на водопідготовку. Одночасно фосфор належить до невідновлюваних корисних копалин, запаси яких поступово вичерпуються, що зумовлює економічну доцільність його повернення у виробничий цикл. Тому поєднання процесу очищення стічних вод із подальшим використанням вилучених фосфатів у виробництві добрив відповідає принципам сталого розвитку та циркулярної економіки.*

*У роботі представлено результати експериментального дослідження ефективності вилучення фосфатів із модельних розчинів у динамічних і періодичних умовах із використанням адсорбентів різної природи. У динамічних випробуваннях найвищу ефективність продемонстрував природний цеоліт, який забезпечив ступінь очищення 94,5%, що значно перевищує показники активованого вугілля, глауконіту та подрібненої шкарлупи волоського горіха (67,75 – 76,5%). У періодичних умовах найшвидше вилучення фосфатів (98 % за 2 години) спостерігалось для активованого вугілля, однак цеоліт проявив кращий баланс між ефективністю очищення та можливістю подальшої екологічно безпечної утилізації.*

*Особливу увагу приділено перспективам повторного використання насичених адсорбентів. Показано, що цеолітові осади можуть слугувати доступною сировиною для виробництва мінеральних і органо-мінеральних добрив пролонгованої дії, які покращують структуру ґрунту, підвищують утримання вологи та зменшують втрати поживних елементів. На основі отриманих даних запропоновано удосконалену технологічну схему очищення міських стічних вод із впровадженням стадії доочищення у контактних відстійниках із дозуванням цеоліту (1 г/дм<sup>3</sup>, 60 хв контакту). Запропоноване рішення забезпечує не лише значне зниження концентрації фосфатів, але й створює умови для інтеграції процесів очищення та ресурсного відновлення, що є важливою перевагою для сучасних очисних споруд.*

**Ключові слова:** *стічні води, адсорбція цеоліт, фосфати, добрива, пролонгована дія, технологічна схема.*

**A. V. IVANCHENKO**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Chemical and Biological Technologies  
Dniprovsky State Technical University  
ORCID: 0000-0002-1404-7278

**V. V. VORONOV**

Postgraduate Student at the Department of Chemical and Biological Technologies  
Dniprovsky State Technical University  
ORCID: 0009-0004-3717-01-31

YU. O. SEREDA

Master at the Department of Chemical and Biological Technologies

Dniprovsky State Technical University

ORCID: 0009-0000-4272-03-97

## ADSORPTION EXTRACTION OF PHOSPHORUS FROM LIQUID WASTE WITH UTILIZATION OF SEDIMENTS IN FERTILIZER

*The study is dedicated to solving the problem of removing phosphorus from wastewater, which is extremely relevant in modern conditions of increasing anthropogenic load on water resources. Excessive input of phosphates into natural reservoirs causes intensive eutrophication, deterioration of water quality, reduction of biodiversity and increase in costs for water treatment. At the same time, phosphorus belongs to non-renewable minerals, the reserves of which are gradually depleted, which determines the economic feasibility of its return to the production cycle. Therefore, the combination of the wastewater treatment process with the subsequent use of extracted phosphates in the production of fertilizers corresponds to the principles of sustainable development and circular economy.*

*The paper presents the results of an experimental study of the efficiency of phosphate removal from model solutions in dynamic and periodic conditions using adsorbents of various nature. In dynamic tests, the highest efficiency was demonstrated by natural zeolite, which provided a degree of purification of 94.5%, which significantly exceeds the indicators of activated carbon, glauconite and crushed walnut shell (67.75–76.5%). In batch conditions, the fastest phosphate removal (98% in 2 hours) was observed for activated carbon, but the zeolite showed a better balance between cleaning efficiency and the possibility of further environmentally safe disposal.*

*Special attention is paid to the prospects of reuse of saturated adsorbents. It is shown that zeolite sediments can serve as an available raw material for the production of long-acting mineral and organo-mineral fertilizers that improve soil structure, increase moisture retention, and reduce the loss of nutrients. On the basis of the obtained data, an improved technological scheme of urban wastewater treatment with the introduction of the post-treatment stage in contact settling tanks with zeolite dosage (1 g/dm<sup>3</sup>, 60 min of contact) is proposed. The proposed solution provides not only a significant reduction in the concentration of phosphates, but also creates conditions for the integration of cleaning processes and resource recovery, which is an important advantage for modern treatment facilities.*

**Key words:** wastewater, zeolite adsorption, phosphates, fertilizers, prolonged action, technological scheme.

### Постановка проблеми

Актуальність адсорбційного вилучення фосфору та утилізації осадів у добрива визначається екологічними, економічними та ресурсними чинниками. Цей підхід є частиною стратегії циркулярної економіки, що спрямована на відновлення цінних ресурсів із відходів. Основна екологічна причина – це запобігання евтрофікації (надмірному заростанню) водойм. Фосфор є ключовим лімітуючим біогенним елементом, який, потрапляючи зі стічними водами та сільськогосподарським стоком у річки та озера, спричиняє інтенсивний ріст водоростей і ціанобактерій. Це призводить до зниження концентрації розчиненого кисню, загибелі риби та інших водних організмів. Адсорбція є перспективним методом вилучення фосфору, особливо у порівнянні з традиційним хімічним осадженням, оскільки вона ефективна навіть при низьких концентраціях фосфору у стічних водах. Метод адсорбції передбачає використання різноманітних доступних та недорогих адсорбентів, часто виготовлених з відходів (модифіковані глини, сорбенти з рослинної сировини).

Разом з цим, фосфор – це незамінний елемент для сільського господарства, адже є складовою добрив. Його світові запаси обмежені та невідновлювані. Утилізація фосфоровмісних осадів (зокрема, осаду стічних вод або матеріалів, насичених фосфором після адсорбції) дозволяє повернути цей цінний елемент назад у ґрунт як добриво. Це сприяє продовольчій безпеці та зменшує залежність від імпорту фосфатних порід. Адсорбційне вилучення фосфору у поєднанні з переробкою отриманих осадів у добрива є життєво важливою ланкою у забезпеченні екологічної стійкості (захист водойм) та економічної безпеки (збереження фосфорного ресурсу).

Утилізація цих осадів шляхом перетворення на добрива дозволяє зменшити площі для полігонів і мулових майданчиків, отримати додаткову економічну вигоду від реалізації добрив, покращити структуру ґрунту, оскільки осад часто містить органічні речовини та мікроелементи. Осади, отримані після очищення, особливо після адсорбційного вилучення фосфору, можуть бути перероблені в органо-мінеральні добрива. Це дозволяє забезпечити сільське господарство дешевими добривами, сприяти біологічно виправданому використанню відходів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фосфор є мінеральною поживною речовиною, необхідною для росту рослин і, таким чином, для сучасного сільського господарства [1, 2]. Ця хімічна сполука має багато природних та антропогенних джерел походження і вважається основним забруднювачем, оскільки може накопичуватися і досягати небезпечних концентрацій у водних об'єктах внаслідок гірничодобувної, промислової та сільськогосподарської діяльності, а також скидів стічних вод [3]. Коли це відбувається, може бути індукована евтрофікація, яка характеризується надмірним ростом водоростей, особливо синьо-зелених (тобто ціанобактерій). Деякі автори вказують, що концентрація фосфатів

у водосховищі на рівні  $0,02 \text{ мг/дм}^3$  є достатньою для стимуляції росту водоростей. Евтрофікація може призвести до різкого зменшення розчиненого кисню за відсутності сонячного світла і, як наслідок, до депопуляції водних видів, створення "мертвих зон". Уникнення цього явища є вкрай важливим, оскільки відомо, що відновлення водойми, яка зазнала евтрофікації, є дуже повільним процесом. Хоча нітроген також відіграє певну роль, в літературі вказується, що фосфор є головним винуватцем евтрофікації [4, 5], що виправдовує увагу до видалення фосфатів з води.

Глинисті матеріали широко вивчаються як адсорбенти для багатьох забруднювачів, завдяки таким цікавим властивостям, як поширеність, реакційна здатність і велика питома поверхня. Однак, що стосується поглинання фосфатів, кількість досліджень досить обмежена і практично обмежується бентонітом (або монтморилонітом) і палигорськітом. При кислотній обробці палигорськіту перед застосуванням для вилучення фосфатів відбувається розчинення катіонів і кремнію, що збільшує площу поверхні, пористість і адсорбцію фосфору [6].

Бентоніти для вилучення фосфору були модифіковані різними гідроксидами металів. Запропоновано також модифікувати бентоніт за допомогою  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , що призвело до утворення кластерів між шарами, покращення площі поверхні [7].

Поглинання фосфатів глинистими матеріалами відбувається відносно швидко, причому адсорбційна рівновага досягається за 1–2 год для модифікованих палигорськіту і монтморилоніту [6,7].

Запропоновано нові способи покращення якості річкової води шляхом сорбційного вилучення надлишку фосфат-іонів із стічних вод прибережних населених пунктів. Запропоновано вилучати фосфат-іони за допомогою природного сорбенту бентоніту, активованого мікрохвилями у різні способи. Мікрохвильова активація цього сорбенту збільшує коефіцієнт вилучення фосфат-іонів із стічних вод у декілька разів, порівняно з нативним бентонітом [8].

Цеоліти – це алюмосилікатні мінерали, які зазвичай використовуються як адсорбенти. Вони діють на видалення Р з високоміцних реальних стічних вод шляхом адсорбції допомогою іонного обміну, викликаючи вивільнення іонів кальцію, які осаджуються разом з фосфатом [9, 10]. Кілька досліджень показують, що можна підвищити здатність цеолітів до поглинання фосфатів шляхом включення металів.

Перспективним вбачається продовження експериментальних досліджень із застосуванням цеоліту для вилучення фосфат-аніонів з модельних та реальних стічних вод. Одним із невирішених питань застосування даного методу очищення є утилізація осадів після сорбції фосфатів.

Раніше нами розроблено технологію одержання органо-мінеральних добрив з продуктів очистки міських стічних вод від фосфатів. У якості сировини для одержання добрив застосовувався торф, насичений фосфатами, кальцій фосфат, ферум(III) фосфат, активний мул міських очисних споруд [11]. Вміст поживних речовин у одержаних добривах на суху речовину, мас.% не менше: С – 70–90;  $N_{\text{зар.}}$  – 1,6;  $P_2O_5$  – 3,8–20;  $K_2O$  – 0,1.

Основна ідея проведення даного дослідження є застосування відпрацьованих осадів після вилучення сполук фосфору для одержання добрив пролонгованої дії. Адже відомо, що мінеральні та органо-мінеральні добрива, що містять у своєму складі цеоліт, мають високу міцність до стирання, низьку запиленість, екологічно безпечні, багаторічні та мають пролонговану дію і покращені агрохімічні властивості [12].

#### Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – встановити особливості процесу вилучення фосфатів з модельних розчинів з безпечною утилізацією цеолітових осадів у добрива.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення експериментальних досліджень у якості вихідного модельного розчину використали розчин натрій гідрофосфату концентрацією  $100 \text{ мг/дм}^3$ . Для проведення експериментального дослідження зібрано наступну лабораторну установку (рис. 1).

Світлина лабораторної установки показана на рис. 2.

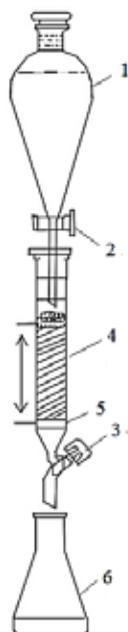
У якості природних сорбентів випробувано сорбент на основі шкарлупи волоського горіха, цеоліт та активоване вугілля (проба порівняння).

Модельний розчин фосфору пропущено через сорбенти у лабораторному реакторі-адсорбері, наприкінці експерименту визначено концентрацію неорганічних фосфатів у пробах після очищення.

В наступному експерименті Природний алюмосилікат глауконіт застосовано з використанням верхньоприводної мішалки при інтенсивності перемішування 700 обертів за хвилину, витраті сорбенту  $1 \text{ г/дм}^3$  тривалістю адсорбції 1 година.

Для визначення концентрації неорганічних фосфатів у стічній воді використано фотометричний метод (відновлення аскорбіновою кислотою), при застосуванні такої апаратури: колориметр, червоний світлофільтр (при довжині хвилі 690 нм), кювети товщиною шару 5 см. Виміри походилися із застосуванням колориметра фотоелектричного концентраційного КФК–2.

Гістограма результатів адсорбційного вилучення сполук фосфору з модельних розчинів показана на рис. 3.



**Рис. 1. Лабораторна установка вилучення сполук фосфору з рідких відходів природними алюмосилкатами**

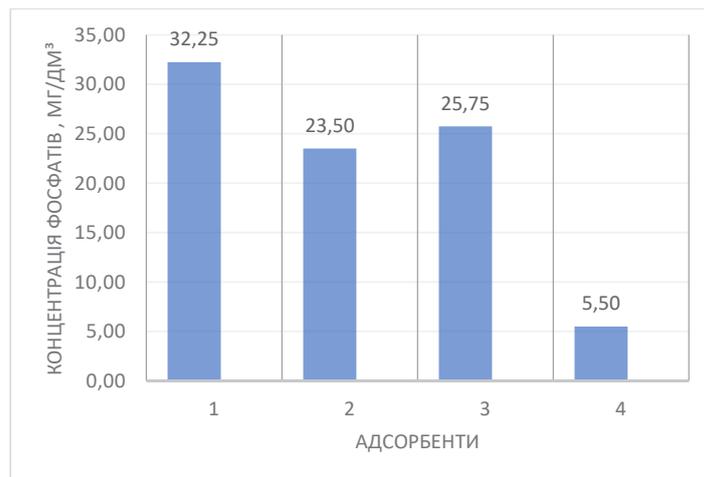
1 – воронка з модельним розчином; 2,3 – кран; 4 – шар адсорбенту; 5 – скляний фільтр; 6 – приймач для збору очищеного розчину



**Рис. 2. Світлина лабораторної установки вилучення сполук фосфору з рідких відходів природними алюмосилкатами**

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при використанні природного адсорбенту на основі горіхової шкарлупи вміст фосфатів знижено з 100 мг/дм<sup>3</sup> до 32,25 мг/ дм<sup>3</sup>, активованого вугілля до 23,5 мг/дм<sup>3</sup>, глауконіту до 25,75 мг/ дм<sup>3</sup>, цеоліту до 5,5 мг/ дм<sup>3</sup>.

Таким чином, найвищу ефективність у динамічних умовах з використанням адсорбційної колонок проявив цеоліт. Ефективність очищення цеолітом становила  $E_{\text{ц}} = \frac{100 - 5,5}{100} * 100 = 94,5\%$ ,  $E_{\text{глаук.}} = \frac{100 - 25,75}{100} * 100 = 74,25\%$ ,  $E_{\text{акт.вуг.}} = \frac{100 - 23,5}{100} * 100 = 76,5\%$ ,  $E_{\text{горіх.}} = \frac{100 - 32,25}{100} * 100 = 67,75\%$ .



**Рис. 3. Результати адсорбційного вилучення сполук фосфору з модельних розчинів вихідною концентрацією 100 мг/дм<sup>3</sup>**

1 – шкарлупа волоського горіха; 2 – вугілля активоване; 3 – глауконіт; 4 – цеоліт

Наступні експериментальні дослідження проведено із використанням адсорбційного реактора з верхньоприводною мішалкою, світлина якого зображена на рис. 4.



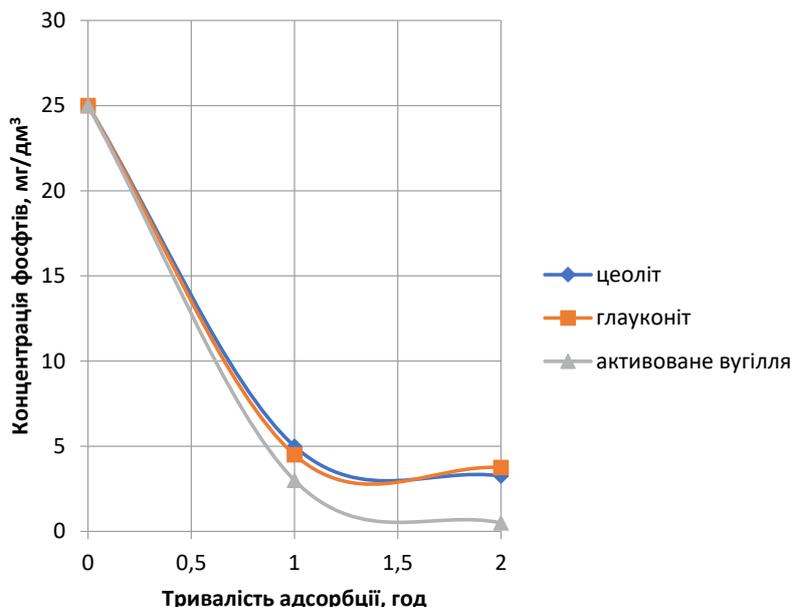
**Рис. 4. Світлина лабораторного реактора з верхньоприводною мішалкою**

На рис. 5 представлена залежність залишкового вмісту фосфору від тривалості контакту адсорбентів з модельним розчином.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при використанні цеоліту концентрація фосфору знижується з 25 мг/дм<sup>3</sup> до 5 мг/дм<sup>3</sup> через годину та до 3,25 мг/дм<sup>3</sup> через 2 години експерименту; при використанні глауконіту концентрація фосфору знижується з 25 мг/ дм<sup>3</sup> до 4,5 мг/дм<sup>3</sup> через годину та до 3,75 мг/ дм<sup>3</sup> через 2 години експерименту.

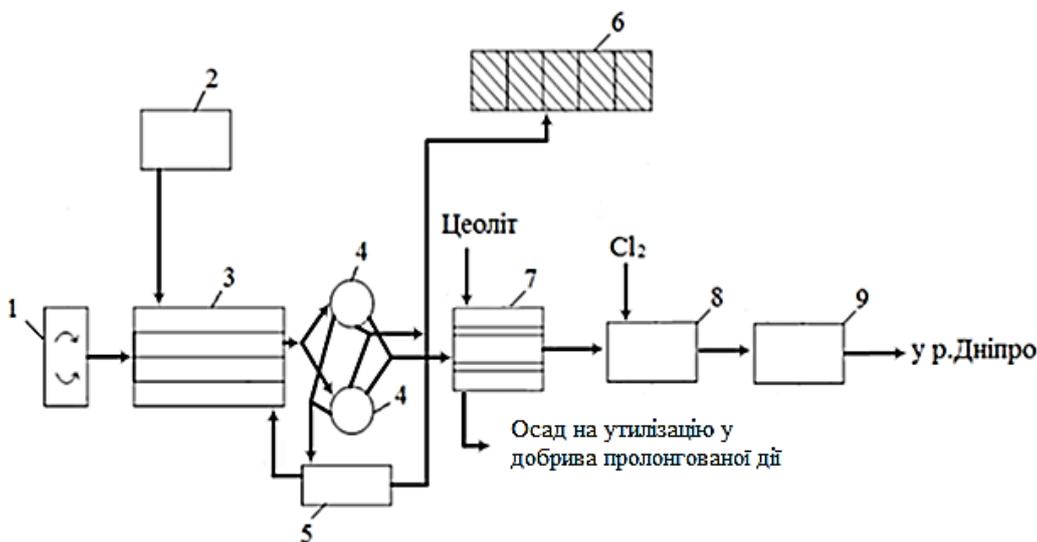
Також виявлено, що при використанні активованого вугілля концентрація фосфору знижується з 25 мг/ дм<sup>3</sup> до 3 мг/ дм<sup>3</sup> через годину та до 0,5 мг/ дм<sup>3</sup> через 2 години експерименту. Встановлено, що класичний адсорбент активоване вугілля виявив найвищі показники очищення. Ефективність очистки становить:  $E_{\text{вуг}} = \frac{25 - 0,5}{25} * 100\% = 98\%$ .

Із алюмосилікатів (цеоліт та глауконіт), що використовувались в експерименті – найбільш ефективним виявився цеоліт:  $E_{\text{цеол}} = \frac{25 - 3,25}{25} * 100\% = 87\%$ .



**Рис. 5. Залежність залишкового вмісту фосфору від тривалості контакту адсорбентів з модельним розчином**

Таким чином, природний цеоліт можна рекомендувати для промислового впровадження на очисних спорудах з підвищеним вмістом фосфору. На основі експериментальних досліджень розроблено технологічну схему адсорбційної очистки міських стічних вод від фосфатів, яка представлена на рис. 6.



**Рис. 6. Технологічна схема адсорбційної очистки міських стічних вод від фосфатів**

1 – змішувач побутових і промислових стоків; 2 – компресорна; 3 – аеротенки; 4 – вторинні радіальні відстійники; 5 – мулова насосна станція; 6 – мулові майданчики; 7 – контактні відстійники; 8 – хлораторна; 9 – ставки накопичувачі

Процес очищення відбувається наступним чином. Освітлені стічні води після первинних відстійників прямують у змішувач промислових і побутових вод 1. Час змішування складає 10 хв. У змішувачі 1 стічні води, що пройшли механічне очищення, усереднюються за складом і концентрацією забруднень. Після змішування стічні води поступають на біологічне очищення в аеротенки 3, куди подається повітря з компресорної 2 для підтримання життєдіяльності мікроорганізмів активного мулу. Аеротенки повинні забезпечувати необхідний ефект окислювання і мінералізації органічних речовин, що містяться в стічних водах. Після біологічного очищення, суміш стічних вод та активного мулу по трубопроводу відводиться у вторинні радіальні відстійники 4. Активний мул, що осів

з вторинних відстійників 4, відділяється в мулову насосну станцію 5, з якої повертається в аеротенки. Зі станції 5 за допомогою насосу надлишковий активний мулу перекачується на майданчики 6. Далі освітлені стічні води поступають на доочищення від фосфатів у контактні відстійники 7, у які зверху подається цеоліт в якості адсорбенту витратою 1 г/дм<sup>3</sup>, тривалість контактування стоків та цеоліту складає 60 хвилин. Осад після адсорбційної очистки міських стічних вод від фосфатів рекомендовано використовувати у якості сировини для одержання мінеральних та органо-мінеральних добрив пролонгованої дії. Після доочищення від фосфатів стоки перекачуються до хлораторної 8, де знезаражуються і через ставки-накопичувачі 9 поступають у природну водойму.

#### Висновки

Актуальність дослідження обумовлена екологічними (запобігання евтрофікації водойм) та економічно-ресурсними (відновлення обмежених запасів фосфору) чинниками, що відповідає принципам циркулярної економіки. Адсорбційне вилучення фосфору зі стічних вод із подальшою утилізацією осадів у добрива є важливою ланкою у забезпеченні екологічної стійкості та продовольчої безпеки. Експериментальні дослідження адсорбційного вилучення фосфатів із модельних розчинів концентрацією 100 мг/дм<sup>3</sup> у динамічних умовах (адсорбційні колонки) показали найвищу ефективність при застосуванні цеоліту (94,5%). Природні матеріали (шкарлупа волоського горіха, глауконіт) і активоване вугілля мали нижчі показники очищення (67,75 % – 76,5 %). В умовах періодичної дії (реактор з мішалкою, вихідна концентрація полютанту  $C_{вих} = 25$  мг/дм<sup>3</sup>) найвищу ефективність вилучення фосфору спостерігали при застосуванні активованого вугілля (98 %) за 2 години, тоді як серед алюмосилікатів цеоліт проявив кращий результат (87%) порівняно з глауконітом. З огляду на необхідність безпечної та економічно вигідної утилізації, природний цеоліт рекомендовано для промислового впровадження на очисних спорудах з підвищеним вмістом фосфору, оскільки цеолітовмісні органо-мінеральні добрива мають пролонговану дію та покращені агрохімічні властивості. Дослідження підтверджують можливість використання відпрацьованих цеолітових осадів як сировини для одержання мінеральних та органо-мінеральних добрив пролонгованої дії. Запропоновано та обґрунтовано технологічну схему очищення міських стічних вод, що включає доочищення після біологічної обробки у контактних відстійниках з додаванням цеоліту (1 г/дм<sup>3</sup> при 60 хв контакту) як адсорбенту. Ця схема дозволяє не лише ефективно знижувати концентрацію фосфатів у стічних водах, а й інтегрувати процес відновлення ресурсу фосфору шляхом переробки насиченого осаду у добрива.

#### Список використаної літератури

1. Vance C. P., Uhde-Stone C., Allan D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New phytologist*. 2003. V. 157. №. 3. P. 423–447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
2. De-Bashan L. E., Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Water research*. 2004. V. 38. №. 19. P. 4222–4246. DOI:10.1016/j.watres.2004.07.014
3. Loganathan P. et al. Removal and recovery of phosphate from water using sorption. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. V. 44. №. 8. P. 847–907. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.741311>
4. Smith V. H., Schindler D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in ecology & evolution*. 2009. V. 24. №. 4. P. 201–207. DOI:10.1016/j.tree.2008.11.009
5. Schindler D. W. et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science & Technology*. 2016. V. 50. №. 17. P. 8923–8929. DOI: 10.1021/acs.est.6b02204
6. Ye H. et al. Adsorption of phosphate from aqueous solution onto modified palygorskites. *Separation and Purification Technology*. 2006. V. 50. №. 3. P. 283–290.
7. El Bouraie M., Masoud A.A. Adsorption of phosphate ions from aqueous solution by modified bentonite with magnesium hydroxide Mg(OH)<sub>2</sub>. *Applied Clay Science*. 2017. V. 140. P. 157–164. DOI: 10.1016/j.clay.2017.01.021
8. Бойчук Б.Я. Порівняння ефективності різних способів мікрохвильової активації бентоніту у процесі очищення ним стічних вод від надлишку фосфатів. *Науковий вісник ХНТУ України*. 2022. т. 32, № 2. С.45–49. <https://doi.org/10.36930/40320207>
9. Wan C. et al. Simultaneous recovery of nitrogen and phosphorus from sludge fermentation liquid by zeolite adsorption: Mechanism and application. *Separation and Purification Technology*. 2017. V. 180. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.031>
10. Mitrogiannis D. et al. Phosphate recovery from real fresh urine by Ca(OH)<sub>2</sub> treated natural zeolite. *Chemical Engineering Journal*. 2018. V. 347. P. 618–630. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.102>
11. Іванченко А.В. Одержання органо-мінеральних добрив з продуктів очистки міських стічних вод від фосфатів : дис... канд. техн. наук : 05.17.01 /Дніпродзержин. держ. техн. ун-т. Дніпродзержинськ, 2010. 181 с.
12. Патент України № 158220 Спосіб протиточно-ступінчатої адсорбційної очистки стічних вод від неорганічних фосфатів та поверхнево-активних речовин Іванченко А.В., Гуляев В.М., Воронов В.В., Сокол О.Д. Сорока О.В. МПК B01D 15/02; власник Дніпровський державний технічний університет. № у 2024 03018; заявл. 07.06.2024, опубл. 09.01.2025, бюл. № 2.

## References

1. Vance C. P., Uhde-Stone C., Allan D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423–447.
2. De-Bashan L. E., Bashan, Y. (2004). Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Water Research*, 38(19), 4222–4246.
3. Loganathan P., et al. (2014). Removal and recovery of phosphate from water using sorption. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(8), 847–907.
4. Smith V. H., Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology Evolution*, 24(4), 201–207.
5. Schindler, D. W., et al. (2016). Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 8923–8929.
6. Ye, H., et al. (2006). Adsorption of phosphate from aqueous solution onto modified palygorskites. *Separation and Purification Technology*, 50(3), 283–290.
7. El Bouraie, M., Masoud, A. A. (2017). Adsorption of phosphate ions from aqueous solution by modified bentonite with magnesium hydroxide  $Mg(OH)_2$ . *Applied Clay Science*, 140, 157–164.
8. Boichuk, B. Ya. (2022). Porivniannia efektyvnosti riznykh sposobiv mikrokhvylovoi aktyvatsii bentonitu u protsesi ochyshchennia nym stichnykh vod vid nadlyshku fosfativ [Comparison of the efficiency of different microwave activation methods of bentonite in wastewater purification from excess phosphates]. *Naukovyi Visnyk NLTU Ukrainy*, 32(2), 45–49. [in Ukrainian].
9. Wan, C., et al. (2017). Simultaneous recovery of nitrogen and phosphorus from sludge fermentation liquid by zeolite adsorption: Mechanism and application. *Separation and Purification Technology*, 180, 1–12.
10. Mitrogiannis D., et al. (2018). Phosphate recovery from real fresh urine by  $Ca(OH)_2$  treated natural zeolite. *Chemical Engineering Journal*, 347, 618–630.
11. Ivanchenko A.V. (2010). Oderzhannia organo-mineralnykh dobryv z produktiv ochystky miskykh stichnykh vod vid fosfativ [Production of organo-mineral fertilizers from the products of purification of municipal wastewater from phosphates] (Dissertation of a candidate of technical sciences 05.17.01). Dniprodzerzhynsk State Technical University. 181 p. [in Ukrainian].
12. Ivanchenko A.V., Huliaiev V.M., Voronov V.V., Sokol, O. D., Soroka O.V. (2025). Sposib protytochno-stupinchastoi adsorbtsiinoi ochystky stichnykh vod vid neorganichnykh fosfativ ta poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn [Counter-current stepwise adsorption treatment of wastewater from inorganic phosphates and surfactants]. Patent of Ukraine No. 158220, u2024 03018. Filed 07.06.2024, published 09.01.2025. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025  
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025  
Дата публікації: 31.12.2025