

**О.О. ШЕВЧЕНКО**, аспірант, ЧДІЕУ, Чернігів;

**І.М. ІВАНОВА**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ЧДІЕУ, Чернігів

## **ЗАСТОСУВАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД ВІД БІОГЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Розглянуто напрями робіт з удосконалення очищення стічних вод за допомогою біотехнології нітри-денітрифікації і біологічної дефосфатизації із застосуванням ступінчастої схеми очистки стічних вод в коридорних аеротенках з метою створенням в аеротенку трьох типів зон: аеробної, аноксидної і анаеробної для ефективного видалення сполук азоту і фосфору.

**Ключові слова:** нітри-денітрифікація, біогенні елементи, аеробні умови, анаеробні умови, аноксидні умови, біологічна дефосфатизація.

**Вступ.** Проблема забруднення біогенними елементами водних об'єктів та їх охорона є одним з першочергових завдань з екологічної безпеки не тільки в Україні, але й в багатьох інших країнах світу. Основним джерелом забруднення водойм, що призводить до погіршення якості води і порушення нормальних умов життєдіяльності гідробіонтів, є скиди недостатньо очищених стічних вод.

Міські очисні споруди, в яких біологічне очищення стічних вод здійснюється за традиційною схемою *аеротенк-вторинний відстійник* (що має місце на переважній більшості очисних споруд України), не забезпечують доведення якості очистки стічних вод до вимог їх скиду у водойми рибогосподарського призначення за концентраціями різних форм азоту і фосфору [1]. Причини низької ефективності роботи очисних споруд можуть бути різні: помилки при проектуванні, використання застарілих неефективних технологій, порушення регламенту експлуатації споруд та зміна (у порівнянні з проектними) складу та кількості стічних вод у зв'язку з розвитком промисловості та комунального господарства [2].

**Аналіз останніх досліджень.** Вирішення проблеми забруднення водних об'єктів недостатньо очищеними стічними водами можливе шляхом реконструкції переважної більшості каналізаційних очисних споруд з використанням передових технологій та нових розробок в галузі очищення стічних вод [3]. Основна увага в даний час приділяється процесам, які здатні одночасно видаляти із стічних вод і фосфор, і азот [4]. З урахуванням екологічних факторів таким методом є біологічний метод видалення азоту і фосфору із застосуванням біотехнології нітри-денітрифікації та біологічної дефосфатизації.

В практиці видалення біогенних речовин зі стічних вод є кілька випро-

буваних схем: A/O, AAO, Bardenpho, Phoredox, UCT, EASC, JNB і безліч їх модифікацій [5]. Всі вони умовно розділені на кілька зон: анаеробну, аноксидну і аеробну.

Принцип біовидалення фосфору, заснований на життєдіяльності мікроорганізмів *Acinebacter*, розроблений інститутом МосводоканалНИИПроект. Процес біофільтрації у висхідному потоці «Біофора», розроблений фірмою «ДЕГРЕМОНТ» (Франція), впроваджений на станції «амбре» в Парижі [4].

Реалізація біотехнологій нітри-денітрифікації і біологічної дефосфатації пов'язана зі створенням в аеротенку трьох типів зон [6]:

- аеробної зони (висока концентрація розчиненого кисню), де протікають процеси аеробної очистки від органічних речовин, нітрифікація (біоокислення амонійного азоту до нітратного) і дефосфотизація (швидке споживання фосфатів фосфорними бактеріями);

- аноксидної зони (розчинений кисень практично відсутній, але є нітрати, а також органічні речовини), де відбувається процес денітрифікації;

- анаеробної зони (немає розчиненого кисню, немає нітратів і нітритів, але є органічні речовини) де відбувається збродження органічних речовин до ацетату, який споживається фосфорними бактеріями з виділенням в середовище фосфатів.

Аноксидні і анаеробні умови створюються заміною аерації на механічне перемішування, хоча для діючих очисних споруд така реконструкція має достатньо високу вартість. Але існує і альтернативний підхід, який полягає у створенні аноксидних умов в аеротенку за рахунок низької (мінімально допустимої для запобігання осадженню активного мулу) інтенсивності аерації.

Для діючих аеротенків, які працюють в традиційному аеробному режимі, впровадження біотехнології нітри-денітрифікації та біологічної дефосфатації при збереженні продуктивності за стоками потребує інтенсифікації очистки. Підвищення швидкості аеробних процесів, включаючи нітрифікацію і біоокислення органічних речовин, дозволяє зменшити об'єм аеробної зони з виділенням в аеротенку аноксидних і анаеробних зон.

**Постановка задачі.** Актуальною на сьогоднішній день є розробка та наукове обґрунтування методу нітри-денітрифікації міських стічних вод в коридорних аеротенках, а також створення технологічної схеми роботи коридорного аеротенка, яка б забезпечила комплексність очищення стічних вод від біогенних елементів та органічних речовин, була б надійною в експлуатації, простою в обслуговуванні та мала б мінімальні експлуатаційні витрати.

**Модель запропонованої біотехнології.** Концентрація забруднюючих речовин, що скидаються разом зі стічними водами, після очищення на очисних спорудах КП «Чернігівводоканал» в *р. Білоус*, правобережну притоку *р. Десна*, перевищувала встановлені нормативи гранично допустимого скиду для водойм рибогосподарського призначення у 2011 році за фосфат-іонами

– у 8,1 рази (0,93–1,89 мг/дм<sup>3</sup>), амоній-іонами – у 2,3 рази (0,64–1,79 мг/дм<sup>3</sup>), нітрит-іонам – у 3,9 рази (0,19–0,45 мг/дм<sup>3</sup>). Останнім часом очисні споруди м. Чернігова працюють з перевантаженням [7]. За даними досліджень КП «Чернігівводоканал» [8] відомо, що вхідні фактичні концентрації азоту амонійного в декілька разів перевищують гранично допустимі нормативи регламентовані на очисних спорудах (рис. 1), а найбільша концентрація розчинних азотовмісних речовин надходить саме з господарсько-побутовими водами (рис. 2).

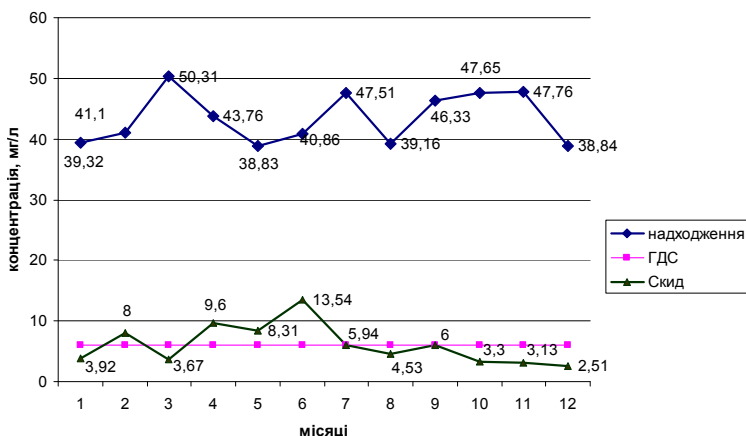


Рис. 1 – Концентрація азоту амонійного у стічних водах на вході та виході з КОС.

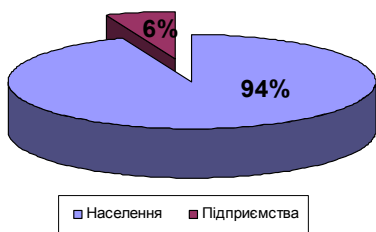


Рис. 2 – Баланс азоту амонійного у стічних водах, що надходять на очисні споруди.

Дисбаланс співвідношення органічних компонентів і азоту призводить до низької ефективності очистки стоків. Для вирішення проблеми, яка склалася навколо очистки стічних вод на каналізаційних очисних спорудах м. Чернігова, необхідно розглянути можливі способи вдосконалення технологічної схеми очистки стічних вод в коридорних аеротенках з метою досягнення регламентованих показників за вищевказаними забрудниками.

Для ефективного видалення біогенних елементів зі стічних вод в коридорних аеротенках із застосуванням біотехнології нітри-денітрифікації є просторове розділення процесів очистки шляхом послідовно розташованих зон для здійснення процесів денітрифікації, окислення органічних речовин і нітрифікації в одну або декілька стадій [3].

Видалення зі стічних вод амонійного азоту обумовлено двома біологічними процесами: споживанням азоту на синтез біомаси і біоокисленням при нітрифікації. Але крім того відбувається суттєве вторинне забруднення води амонійним азотом як в аеротенку, так і у вторинному відстійнику. Органічний азот, який міститься у зважених речовинах стічної води і біомасі активного мулу, в процесі їх біодеструкції виділяється в розчин у вигляді амонійного азоту.

Швидкість біоокислення амонійного азоту визначається першою стадією нітрифікації і може бути виражена через питому швидкість росту бактерій нітрифікаторів роду *Nitrosomonas* [6]:

$$V_N = -\frac{dC_N}{dt} = \frac{\mu_{mN} 1,07^{T-20} C_N C_O}{(k_N + C_N)(k_O + C_O)} \cdot \frac{X \Delta N_n}{\Delta X}, \quad (1)$$

де  $\mu_{mN}$  – максимальна питома швидкість росту нітрифікаторів при 20 °С;  $C_N C_O$  – концентрації амонійного азоту і розчинного кисню;  $k_N, k_O$  – константи напівнасичення для процесу нітрифікації;  $X, \Delta X$  – концентрація активного мулу в аеротенку і його приріст на 1 л стічної води;  $\Delta N_n$  – кількість нітрифікованого азоту на 1 л стічної води;  $T$  – температура мулової суміші в аеротенку (°С).

Швидкість  $V_{Nox}$  вторинного забруднення води амонійним азотом в аеротенку, пов'язана зі швидкістю  $V_{ox}$  біорозпаду (самоокислення) активного мулу, котру можна представити через його вік і визначити так:

$$V_{Nox} = \alpha_N V_{ox}, \quad (2)$$

де  $\alpha_N$  – масова частка азоту в біоокислених органічних речовинах активного мулу (залежить від частки біомаси в активному мулі і в середньому  $\alpha_N = 0,08$ );

На виході всієї системи біологічної очистки, яка включає аеротенк і вторинний відстійник, концентрація амонійного азоту може бути в декілька разів вище, ніж на виході з аеротенка, що спричиняє вторинне забруднення стічної води амонійним азотом, який виділяється з активного мулу в процесі біорозпаду в зоні осаду вторинного відстійника. Щоб запобігти цьому можна підвищити концентрацію кисню в муловій суміші, яка надходить у вторинний відстійник, і зменшити в ньому рівень осаду. Підвищення концентрації кисню на виході з аеротенка вирішує також задачу глибокої очистки від нітратного азоту. При нітрифікації амонійний азот в аеробних умовах перетворюється на нітритний. При цьому не відбувається видалення азоту загальною. Якщо в схему біологічної очистки включити додаткову аноксидну зону, то паралельно з процесом нітрифікації буде відбуватись процес денітрифікації – біовідновлення нітратного азоту в азот молекулярний, який видаляється в атмосферу при аерації. На стадії аерації біовідновлення органічних речовин здійснюється не киснем, а нітратами, що дозволяє скоротити витрату повітря

на аерацію. За окислювальною здатністю 1 г нітратного азоту відповідає 2,86 г молекулярного кисню. Аноксидні зони [9] послуговують не тільки для біовідновлення нітратів, але й для часткової очистки від органічних речовин. Витрата зовнішнього окислювача органічних речовин в аноксидних зонах, в котрі, як правило, надходить стічна вода, складає 0,6 – 0,8 г молекулярного кисню на 1 г видалених органічних речовин за БСК, що відповідає витраті азоту нітратів в кількості 0,2 – 0,3 г на 1 г за БСК, тобто для видалення 1 г нітратного азоту необхідно 3 – 5 г БСК.

Біологічне видалення фосфору [10] пов'язане з трьома процесами: включенням в клітинний матеріал (в основному в нуклеїнові кислоти); включенням до запасних речовин конструктивного обміну (поліфосфати) для синтезу нуклеїнових кислот; включенням до запасних речовин для енергетичного обміну (поліфосфати). У двох останніх процесах фосфор накопичується у вигляді поліфосфатів. Однак поліфосфати, які використовуються для конструктивного обміну, в анаеробних умовах не виділяються із клітин, а поліфосфати, які використовуються для енергетичного обміну, в анаеробних умовах слугують для синтезу АТФ і в кінцевому результаті у вигляді ортофосфатів надходять у навколишнє середовище.

В традиційних схемах біологічної очистки видалений із стічної води фосфор йде на будівництво клітинної речовини активного мулу, фосфати використовуються для забезпечення енергетичних потреб клітин. Тому збільшення споживання фосфору може бути досягнуто в процесі біологічної очистки стічних вод з підвищеним приростом мулу. Але можливість збільшення приросту мулу обмежена. Підвищення приросту мулу в системі аеротенк-вторинний відстійник можна досягти за рахунок зниження концентрації активного мулу і його віку.

Існує думка [11], що зі зменшенням віку мулу ефективність біологічної дефосфатизації зростає відповідно до збільшення приросту мулу. Оскільки технологія нітри-денітрифікації при низькому віці не працює, то важливим завданням є виявлення значень віку активного мулу, при якому спільне застосування технологій нітри-денітрифікації та біологічної дефосфатизації дає найкращий результат.

Закономірність зниження ефективності біологічної дефосфатизації із збільшенням віку може бути описана на основі концепції самоокислення біомаси (*ендогенного дихання*) або концепції енергії підтримки в модифікації, що враховує склад активного мулу [12, 13]. Відповідно до механізму біологічної дефосфатизації видалення фосфору зі стічної води пропорційне приросту фосфорних бактерій, які у свою чергу пропорційні кількості ацетату утвореного в анаеробній зоні.

Принцип біовидалення фосфору заснований на життєдіяльності мікроорганізмів *Acinebacter* [4], які здатні акумулювати більше фосфору, ніж потрібно на приріст. *Acinebacter* зазвичай присутні в активному мулі, але в незначних кількостях через низьку швидкість приросту. Щоб цей мікроорга-

нізм почав грати свою корисну роль, необхідно забезпечити його низькомолекулярними *летючими жирними кислотами* (ЛЖК), які служать субстратом для нього, і створити умови, при яких він здатний використовувати ЛЖК ефективніше інших мікроорганізмів, що знаходяться в біоценозі.

Для оптимального споживання фосфору в аеробній зоні повинно бути достатньо кисню, що перевіряється повнотою нітрифікації. Нітрати уповільнюють процес видалення фосфору, опиняючись в анаеробній зоні, так як при проходженні процесу денітрифікації у цій зоні споживаються ЛЖК для перетворення нітратів у вільний азот, окис азоту. Фосфати в анаеробній зоні починають виділятися тільки після видалення нітратів, отже, якщо концентрація ЛЖК була досить висока, то денітрифікація і вивільнення фосфору можуть відбуватися в одній і тій же споруді.

На основі викладеного вище представлений один із способів застосування технології нітри-денітрифікації [5], який полягає в створенні ступінчатої схеми очистки стоків, без внутрішньої рециркуляції. Згідно цієї схеми стічні води подаються в два або більше реакторів, кожний з яких має зону перемішування і зону аерації. Перемішування активного мулу і стічної рідини можна здійснювати механічними мішалками або повітрям. Пневматичне перемішування призводить до додаткового розчинення кисню і зниження ефективності денітрифікації та селекції бактерій, що акумулюють фосфор.

Реалізація ступінчатої схеми нітри-денітрифікації залежить як від конструкції самого аеротенка, так і від технологічних параметрів.

Технологія ступінчатої денітрифікації працює наступним чином (рис. 3) [14]: стічні води та активний мул подаються в початок аеротенка, де організована зона денітрифікації (анаеробна). У цій зоні відбувається відновлення денітрифікуючими бактеріями нітратів і нітритів, які прийшли зі стічними водами і активним мулом, до молекулярного азоту. Цей процес відновлення нітратів і нітритів, протікає при нестачі кисню і наявності органічних речовин, які не містять азоту, що приходить зі стічними водами. На окислення цих органічних речовин і витрачається кисень нітратів і нітритів. При цьому азот виділяється в атмосферу у вільному вигляді.

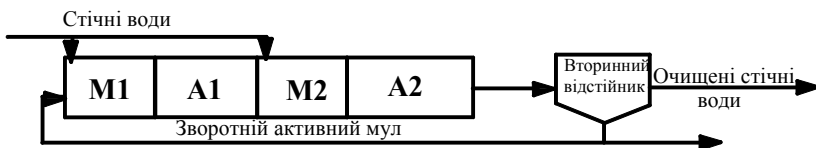


Рис. 3 – Схема ступінчатої денітрифікації:  
M1, M2 – зони перемішування; A1, A2 – зони аерації.

Пройшовши зону денітрифікації, мулова суміш потрапляє в зону нітрифікації (аеробну), де відбувається перетворення нітрифікуючими бактеріями

амонійних солей у нітрити та нітрати, які засвоюються бактеріями.

Далі мулова суміш, насичена нітритами і нітратами, знову потрапляє в зону денітрифікації. Сюди ж подається частина стічних вод, що дозволяє денітрифікуючим бактеріям відновити нітрити та нітрати до молекулярного азоту.

Після цього мулова суміш знову потрапляє в аеробну зону, де відбувається окислення залишкових органічних домішок і сполук азоту (рис. 4).

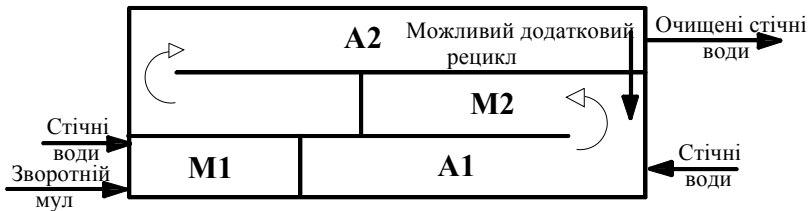


Рис. 4 – Реалізація схеми ступінчастої денітрифікації одномулової системи в трикоридорному аеротенку.

При проходженні муловою сумішшю кисневих та безкисневих зон відбувається використання фосфору для приросту біомаси активного мулу і накопичення фосфору в біомасі фосфоракумулюючих організмів при чергуванні аеробних та анаеробних умов. Для глибокого видалення фосфору за технологією біологічної дефосфотизації процес модифікують шляхом включення анаеробної обробки активного мулу, тобто забезпечуються умови почергового проходження активним мулом аеробних та анаеробних зон, що стимулює розвиток в ньому фосфорних бактерій. Для позитивного застосування цієї біотехнології недопустиме тривале перебування активного мулу в безкисневих умовах на стадіях його обробки, щоб не допустити вихід фосфору із клітин в розчин і його повернення на вхід очисних споруд.

**Висновки.** У світовій практиці перевага надається різним методам очистки стоків, але на нашу думку заслуговує на увагу біотехнологія нітриденітрифікації та дефосфатизації у коридорних аеротенках. Представлена технологічна схема очистки є актуальною для реконструкції трикоридорних аеротенків, і дозволяє використовувати вже побудовані споруди. Для застосування представленої схеми на каналізаційних очисних спорудах м. Чернівців необхідно виконати моделювання процесів очистки, враховуючи конструктивні особливості діючих споруд та концентрації забруднюючих речовин стічних вод, які надходять на очистку. Реалізацію цієї технології необхідно забезпечити створенням аеробних, анаеробних та аноксидних зон для збалансованої очистки стоків за конкуруючими сполуками азоту і фосфору, а також досягненням оптимального приросту мулу та його віку для досконалого проходження процесів окислення біогенів. Конкретний вибір технології очистки

стічних вод повинен проводитись з урахуванням конструкції діючих споруд біологічної очистки.

**Список літератури:** 1. *Поліщук О.В.* Денітрифікація міських стічних вод в коридорних аеротенках: автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» – Київ, 2007. 2. *Зейфман Е.А., Лебедева Е.А., Тихановская Г.А.* Интенсификация процессов очистки сточных вод от биогенных элементов: Учебное пособие, – Вологда: ВоГТУ, 2003. – 121 с. 3. *Грицина О.О.* Підвищення ефективності очищення стічних вод від сполук азоту в аеротенках // Водопостачання та водовідведення, 2012. – № 1. – С. 49-53. 4. *Шевченко Т.А.* Повышение надежности очистки сточных вод от биогенных элементов. puwm.rv.ua»methods/asp/vd/v40288.doc. 5. *Василенко О.А., Грабовський П.О., Ларкіна Г.М.* та ін. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення. – Київ-Одеса: КНУБА, ОДАБА, 2007. – 299 с. 6. *Маскалева С.Е., Большаков Н.Ю.* Математическое моделирование и внедрение эффективных биотехнологий очистки от азота и фосфора на действующих очистных сооружениях канализации // Экология, 2012. – №4. – С. 56-59. 7. Доповідь про стан навколишнього природного середовища Чернігівської області за 2011 рік.– Чернігів, 2012. – 360 с. 8. *Шкінь О.М.* Технічні проблеми при дотриманні законодавчих вимог. Екологічні аспекти водовідведення // IWAS-Міжнар. конф. «Українсько-Німецьке партнерство у галузі водного господарства – завдання для науки і практики». 15-16.12.2008 р. – Івано-Франківськ. – 35 с. 9. *Долина Л.Ф.* Очистка сточных вод от биогенных элементов: Монография. – Днепропетровск: Континент, 2011. – 198 с. 10. *Janssen P.L.J., Meinema K., van der Roest H.F.* Biological Phosphorus Removal. – STOWA Report, 2002. – 209 p. 11. *Мишуков Б.Г.* Расчет сооружений биологической очистки городских сточных вод. – СПб.: Инж.-строит. инст., 1993 г. 12. *Большаков Н.Ю.* Очистка от биогенных элементов на городских очистных сооружениях. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010 г. 13. *Николаев А.Н., Большаков Н.Ю.* Биологическая очистка сточных вод: математическая модель // «Экология и промышленность России», ноябрь, 2001 г. 14. *Щетинин А.И., Мешенгиссер, М.А. Есин, Б.Ю.* и др. Опыт реконструкции очистных сооружений с применением технологии нитриденитрификации // Водопостачання і водовідведення, 2011. – № 3. – С. 41-49.

*Надійшла до редколегії 20.05.2013*

---

УДК 628.355:356

**Застосування біотехнологій для підвищення надійності очистки стічних вод від біогенних елементів / О. О. Шевченко, І. М. Іванова** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2013. – №37 (1010). – С. 215 – 222. Бібліогр.: 14 назв.

Рассмотрены направления работ по совершенствованию очистки сточных вод с помощью биотехнологии нитри-денитрификации и биологической дефосфатизации с применением ступенчатой схемы очистки сточных вод в коридорных аэротенках с целью создания в аэротенке трех типов зон: аэробной, анаксидной и анаэробной для эффективного удаления соединений азота и фосфора.

**Ключевые слова:** нитри-денитрификация, биогенные элементы, аэробные условия, анаэробные условия, анаксидные условия, биологическая дефосфатизация.

The article describes the direction of works to improve wastewater treatment using biotechnology nitrification-denitrification and biological defosfatization with using stepwise scheme of sewage treatment in the corridor aeration with the creation of three types zon aeration basin aerobic, anoxic and anaerobic to effectively remove nitrogzoneen and phosphorus.

**Key words:** nitrification, denitrification, nutrients, aerobic conditions, anaerobic conditions, anoxic conditions, biological dephosphatization.