

УДК 628.35

© **О.А. Василенко**, канд. техн. наук, професор;

О.В. Поліщук, канд. техн. наук, доцент;

Л.О. Василенко

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД ВІД СПЛУК АЗОТУ І ФОСФОРУ НА МІСЬКИХ ОЧИСНИХ СПОРУДАХ

Вивчений досвід роботи діючих аеротенків, в яких реалізовані технологічні схеми біологічного видалення зі стічних вод сполук азоту і фосфору. Напрацьовані рекомендації для проектування споруд із реалізацією зазначених схем.

Ключові слова: біологічне очищення стічних вод, нітрифікація, денітрифікація, біологічне видалення фосфору, аеротенк.

Постановка проблеми. У біологічно очищених традиційним способом стічних водах міститься значна кількість біогенних елементів (з'єднань азоту і фосфору), які, надходячи до водоймищ, призводять до евтрофікації останніх. Бурхливий розвиток водоростей у водоймі стає причиною вторинного забруднення води, підвищення кольоровості, зниження концентрації розчиненого кисню і погіршення її органолептичних показників. „Двітиння” води в природних водоймах значно ускладнює її використання для господарсько-питного водопостачання населених місць і промислових підприємств. Тому вміст основних біогенних елементів в очищених стічних водах повинен жорстко нормуватися.

Згідно із новим ДБН [17], при кількості еквівалентних жителів більше 500, на очисних спорудах повинно бути передбачене біологічне видалення зі стічних вод сполук азоту.

У той же час на переважній більшості очисних споруд України відсутні заходи щодо видалення з'єднань азоту і фосфору. При цьому існує багато методів для очищення стічних вод від біогенних елементів. Можна використовувати різні фізико-хімічні, біологічні і хіміко-біологічні методи. Найбільш ефективним з точки зору балансу рівня очистки та затрат коштів являється біологічний метод видалення з'єднань азоту і фосфору.

Біологічний метод очищення стічних вод від з'єднань азоту ґрунтується на процесах нітри-денітрифікації, що полягають в окислюванні нітрифікуючими бактеріями амонійного азоту до нітратів (нітрифікація) і наступного їхнього відновлення денітрифікуючими бактеріями до газоподібного азоту (денітрифікація). При цьому для життєдіяльності цих

мікроорганізмів використовується зв'язаний кисень нітратів і нітритів, що призводить до зменшення питомої витрати повітря на аерацію стічних вод і, як наслідок, питомих енерговитрат.

Біологічне очищення стічних вод від з'єднань фосфору ґрунтується на здатності деяких груп бактерій (переважно роду *Acinetobacter*) у штучно створених екстремальних умовах (досягаються при зміні зон, у яких перебувають бактерії з анаеробних на аеробні) вилучати з рідкої фази значно більші кількості фосфору, ніж це необхідно для створення клітинної структури (так зване «жадібне поглинання»).

Підвищення ефекту видалення фосфору в спорудах по типу аеротенків можна досягти при сполученні біологічних процесів з хімічним осадженням.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Згідно із новим ДБНом [17], допускається застосовувати досить багато схем, за якими можна здійснювати будівництво нових споруд біологічної очистки та реконструкцію вже діючих аеротенків із впровадженням технологій біологічного видалення азоту і фосфору.

Разом із цим в новому ДБНі [17] не наведені технологічні параметри даних схем, зокрема об'єми аеробних, анаеробних, аноксидних зон, ступені внутрішньої рециркуляції, питомі витрати кисню для нітрифікаторів тощо.

Формулювання цілей статті. Предмет даного дослідження полягає у вивченні досвіду роботи діючих аеротенків, в яких реалізовані технологічні схеми біологічного видалення із стічних вод сполук азоту і фосфору. Метою даного дослідження є напрацювання рекомендацій для проектування споруд із реалізацією зазначених схем.

Виклад основного матеріалу. Нижченаведений аналітичний огляд технологічних схем біологічного видалення зі стічних вод сполук азоту та фосфору, які рекомендовані новим ДБНом [17] та вже знайшли використання на практиці.

На схемах прийняті наступні позначення:

СВ – стічні води, що надходять у споруду;

ОСВ – очищені стічні води;

Р1 – нітратний рецикл;

Р2 – рециркуляція денітрифікованої мулової суміші в анаеробну зону;

ЦАМ – циркуляційний активний мул;

В – вторинний відстійник;

1 – анаеробна зона (має місце при відсутності в рідині як розчиненого кисню, так і зв'язаного кисню нітритів і нітратів);

2 – аеробна зона (створюється при аерації суміші (коли в рідині присутній розчинений кисень));

3 – аноксидна зона (обумовлюється присутністю нітритів і нітратів і відсутністю молекулярного кисню).

Схема модифікованого процесу Людчака-Етінгера

Дана схема складається з аноксидної та аеробної зони із внутрішньою рециркуляцією мулової суміші з кінця нітрифікатору на початок денітрифікатору (рис. 1) [2, 4, 5, 6, 12, 13].

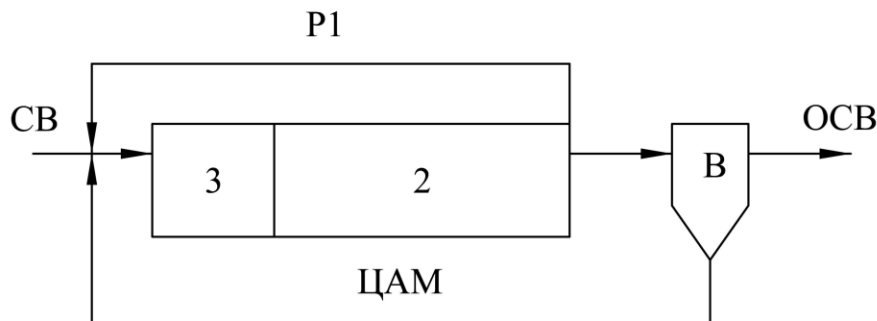


Рис. 1 – Схема модифікованого процесу Людчака-Етінгера з попередньою денітрифікацією

Величина внутрішньої рециркуляції складає від 50% [5, 6] до 200–500% [2] кількості стічних вод, що надходять на очистку.

За такою схемою був реконструйований чотирьохкоридорний аеротенк

Люберецької станції аерації м. Москви. Технологічні параметри роботи реконструйованого аеротенку представлені в таблиці 1 [6].

Таблиця 1 – Технологічні параметри роботи аеротенку, в якому реалізована схема процесу Людчака-Етінгера

Технологічні показники	Стічна вода	
	до очистки	після очистки
Витрата стічної рідини, м ³ /добу	110 000	
Доза мулу, г/л	2–2,3	
Питома витрата повітря, м ³ /м ³	1,4–1,5	
Нітратний рецикл, % від кількості стічних вод, що надходять на очищення	50	
БСК5, мг/л	60–100	3,1
N-NH ₄ , мг/л	15–23	0–0,1
N-NO ₂ , мг/л	дані відсутні	0,004–0,006
N-NO ₃ , мг/л	дані відсутні	8–8,5

Схема процесу АА/О

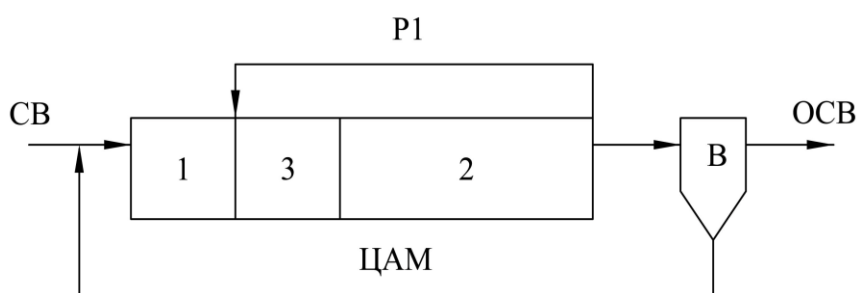


Рис. 2 – Схема процесу АА/О

Схема процесу АА/О чи А²/О (Anaerobic Anoxic/Oxic) (в деяких країнах вона має назву Phoredox (Phoredox modification)) складається з анаеробної, аноксидної та аеробної зон

Розділ 2. Основи природокористування

із рециркуляцією мулової суміші (100–300% [10] (50% [8])) із кінця аеробної зони на початок аноксидної (рис. 2).

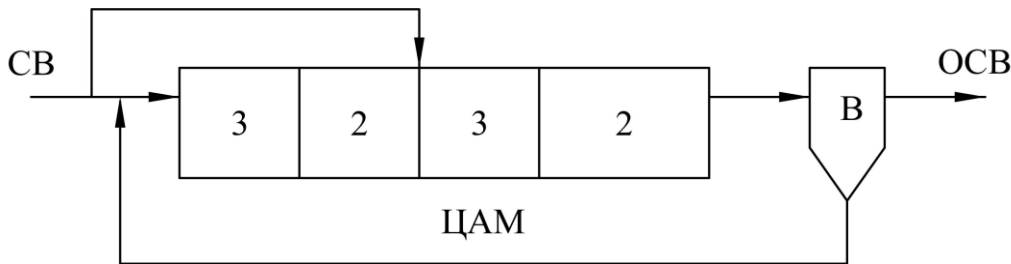
Випробування такої схеми проводилось на дослідній виробничій установці Красносельської станції аерації м. Санкт-Петербурга продуктивністю до 3600 м³/добу. Технологічні параметри схеми А²/О – процесу і результати іспитів наведені в таблиці 2 (в дужках дані технологічні показники схеми процесу АА/О, які відповідають якісним показникам очищеної стічної води, що отримані в результаті експериментів на дослідній установці та наведені в нижній половині таблиці) [7, 8].

Таблиця 2 – Технологічні параметри схеми процесу АА/О

Технологічний показник	Значення	
1	2	
Навантаження по мулу, гБСК ₅ /г б. р. добу	0,15–0,25	
Вік мулу, діб	4–27 (10–15)	
Доза мулу, г/л	2–4 (2,1–2,5)	
Приріст мулу, г/м ³	(0,03–0,06)	
1	2	
Муловий індекс, см ³ /г	(90–120)	
Зони:	Год	%
анаеробна	0,5–1,5	11–18
аноксидна	0,5–1,0	11–15
аеробна	3,5–6,0	70–78
Час перебування, год	4,5–8,5	
Рецикл мулу, %*	20–50 (50)	
Нітратний рецикл, %*	100–300 (50)	
Показники забруднення стічних вод	вхід	вихід
Завислі речовини, мг/л	40–60	<5
БСК ₅ , мг/л	30–60	3–3,2
ХСК, мг/л	130–150	30–60
ХСК(фільтрована проба), мг/л	70–80	30–50
N _{заг} , мг/л	15–16	5–6
N _{заг} (фільтрована проба), мг/л	11–13	5–6
N-NH ₄ , мг/л	10–12	0,2–0,3
P _{заг} , мг/л	2–2,6	1,2–1,4
P _{заг} (фільтрована проба), мг/л	1,3–1,6	1,2–1,4
* У відсотках від витрати стічної води, що надходить на очищення.		

Схема із двохступінчатою подачею стічних вод

Схема із двохступінчатою подачею стічних вод передбачає розділення споруди на чотири частини (рис. 3) [4, 12].



За цією схемою були введені в експлуатацію п'ять чотирьохкоридорних аеротенків Новолюберецької станції аерації м. Москви. При-

Рис. 3 – Схема видалення азоту з двохступінчастою подачею стічних вод

чому 50% подачі вхідних стічних вод були спрямовані в перші коридори, а інша частина – в треті. Технологічні параметри роботи одного такого аеротенку наведені в таблиці 3. Безумовною перевагою цієї схеми є відсутність внутрішніх рециклів.

Таблиця 3 – Технологічні параметри схеми з двохступінчатою подачею стічних вод

Технологічний показник	Значення	
1	2	
Час перебування стічних вод в споруді, год, в тому числі:	14,4	
в нітрифікаторах	9,65	
1	2	
в денітрифікаторах	4,75	
Питома витрата повітря, м ³ /м ³	4,1	
Рецикл активного мулу, %	81,2	
Доза зворотнього мулу, г/л	7,8	
Муловий індекс на виході, см ³ /г	81	
Вік мулу, діб	>20	
Показники забруднення стічних вод	вхід	вихід
Завислі речовини, мг/л	80	5,7
БСК ₅ , мг/л	89	2,2
N-NH ₄ , мг/л	17,7	0,28
N-NO ₃ , мг/л	–	7,8
N _{заг} , мг/л	25,5	6,9
Фосфати (за Р), мг/л	2,1	1,7
P _{заг} , мг/л	4,3	2,3

Схема чотирьохступеневого процесу Bardenpho

Професор Барнард та ін. (ПАР) запропонували схему чотирьохступеневого процесу Bardenpho (Barnard, Denitrification, Phosphorus), за якою очищення стічних вод відбувається шляхом послідовного проходження стічних вод через денітрифікатор і нітрифікатор першого ступеня та денітрифікатор і нітрифікатор другого ступеня. Крім цього, з кінця першого нітрифікатору на початок споруди передбачена рециркуляція мулової суміші (рис. 4) [2, 9, 12].

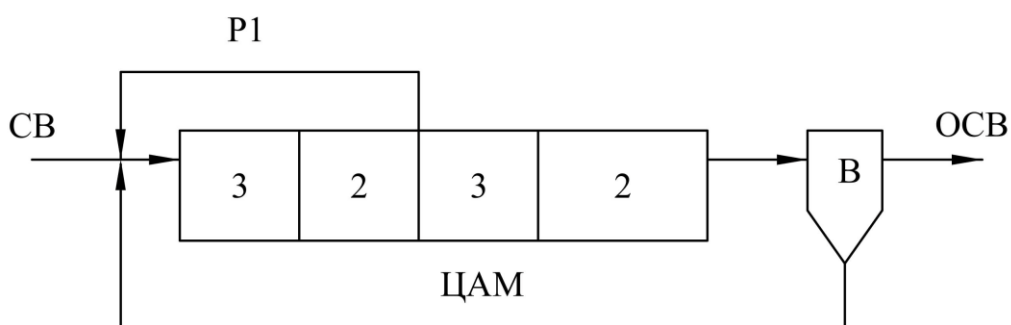


Рис. 4 – Схема чотирьохступінчастого процесу Bardenpho

Варто відмітити, що у другій аноксидній зоні денітрифікація здійснюється за рахунок позата внутрішньоклітинних накопичень неокислених органічних

речовин (в ході ендогенної респірації мулу). Зрозуміло, що для інтенсивної вторинної денітрифікації необхідна достатня кількість субстрату, і тому цю схему доцільно застосовувати при наявності великої кількості речовин, що повільно окислюються, чи домішок промислового походження, які потребують тривалої трансформації перед біодеструкцією.

Схема модифікованого процесу Bardenpho

Розвитком попередньої схеми є схема модифікованого процесу Bardenpho (рис. 5) [1, 7, 9, 12].

Принциповою відмінністю цієї схеми від попередньої є влаштування анаеробної зони перед першою аноксидною. Внаслідок великої тривалості очищення стічних вод (до 23 годин) тут передбачається глибоке окислення амонійного азоту і значна денітрифікація [7]. Технологічні параметри роботи цієї схеми наведені в таблиці 4.

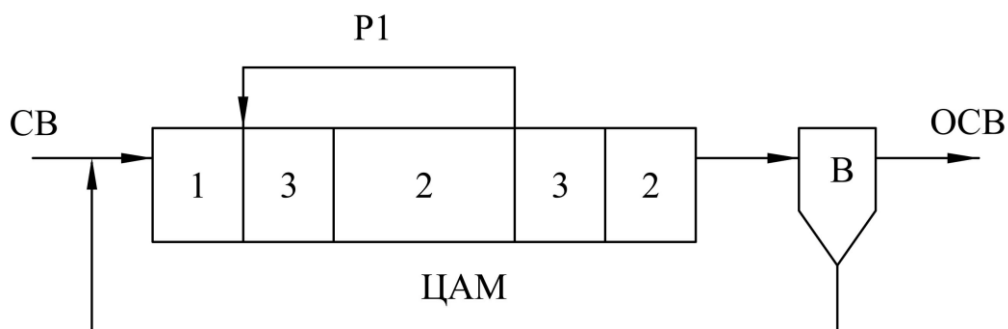


Рис. 5 – Схема модифікованого процесу Bardenpho

Таблиця 4 – Технологічні параметри схеми процесу Vardenpho

Технологічний показник	Значення	
Навантаження по мулу, гБСК ₅ /г б. р. добу	0,1–0,2	
Вік мулу, дів	10–40	
Доза мулу, г/л	2–5	
Зони:	Год	%
анаеробна	1–2	8–11
аноксидна	2–4	17–21
аеробна	4–12	42–52
аноксидна	2–4	17–21
аеробна	0,5–1,0	4–6
Час перебування, год	9,5–23,0	
Рецикл мулу, % від витрати	50–100	
Нігратний рецикл, % від витрати	400	

Схема процесу UCT

Оскільки фосфати і нітрати здійснюють взаємний інгібуючий вплив в анаеробній зоні, виникає необхідність у видаленні нітратів із рециркулюючого активного мулу. Такий варіант

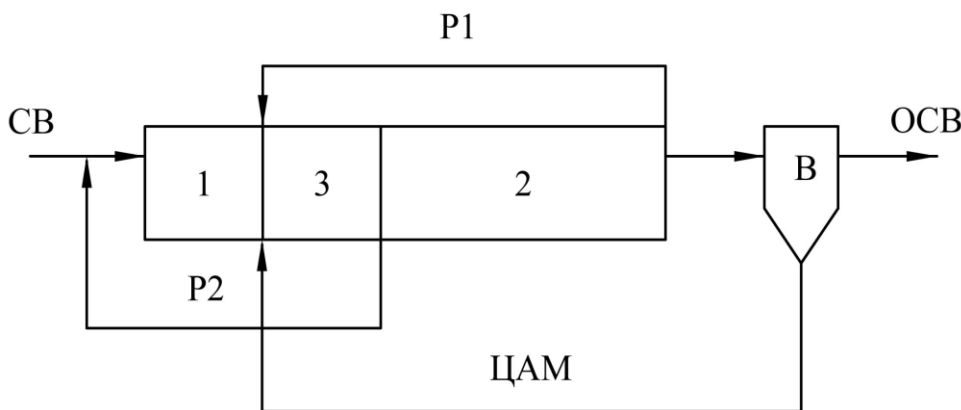


Рис. 6 – Схема процесу UCT

схеми був розроблений Кейптаунським університетом і дістав назву UCT (University of Cape Town) – процес (рис. 6) [7, 8, 9, 12].

За цією схемою циркулюючий активний мул направляється в аноксидну зону, де здійснюється часткова денітри-

фікація, і далі за допомогою рециклу P2 перекачується в анаеробну зону. В аноксидну зону повертаються нітрати з аеробної з рециклом P1.

Розглянута схема була випробувана на дослідній промисловій установці Красносельської станції аерації м. Санкт-Петербургу продуктивністю до 3600 м³/добу. Технологічні параметри схеми UCT – процесу і результати дослідів наведені в таблиці 5 [7, 8].

Таблиця 5 – Технологічні параметри схеми процесу УСТ

Технологічний показник	Значення	
Навантаження по мулу, гБСК ₅ /г б. р. добу	0,1–0,2	
Вік мулу, діб	5–10 (6–40)	
Доза мулу, г/л	1,5–3,0 (1,5–3,8)	
Приріст мулу, г/м ³	(0,04–0,14)	
Муловий індекс, см ³ /г	(70–150)	
Зони:	Год	%
анаеробна	1–2	22–25
аноксидна	1–2	22–25
аеробна	2,5–4,0	50–56
Час перебування, год	4,5–8,0	
Рецикл мулу, %*	50–100 (50–100)	
Внутрішній рецикл, %	200–400	
Нігратний рецикл, %	(50–100)	
Рециркуляція денітрифікованої мулової суміші в анаеробній зоні, %	(55–70)	
Показники забруднення стічних вод	Вхід	Вихід
Завислі речовини, мг/л	50–190	5–16
БСК ₅ , мг/л	40–130	2–12
ХСК, мг/л	100–320	30–80
ХСК (фільтрована проба), мг/л	50–150	20–60
N _{заг} , мг/л	19–29	7–15
N _{заг} (фільтрована проба), мг/л	15–23	6–12
N-NH ₄ , мг/л	13–19	0,2–9,8
P _{заг} , мг/л	2,5–5,3	0,6–1,8
P _{заг} (фільтрована проба), мг/л	1,6–2,6	0,3–1,6
* У відсотках від витрати стічних вод, що надходять на очищення		
Примітка: в дужках дані технологічні показники схеми процесу УСТ, які відповідають якісним показникам очищеної стічної води, що отримані в результаті експериментів на дослідній установці та наведені в нижній половині таблиці		

Схема процесу модифікації УСТ показана на рис. 7 [7, 9, 10, 12].

За цією схемою активний мул (ЦАМ) направляється в першу аноксидну зону, де здійснюється видалення нітратів з мулової суміші (денітрифікація мулу). Далі мул, позбавлений значної кількості нітратів перекачується в анаеробну зону, у якій відбувається вивільнення фосфору без інгібуючого впливу нітратів. Друга аноксидна зона слугує денітрифікатором нітритів і нітратів, що повертаються у складі мулової суміші з аеробної частини. Технологічні параметри роботи цієї схеми наведені в таблиці 6 [7].

Схема процесу МУСТ

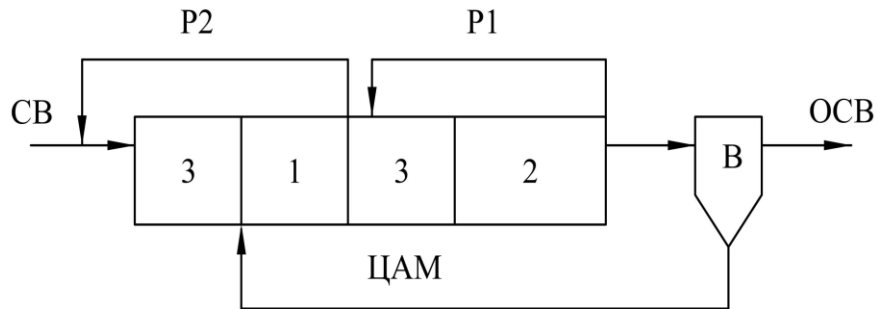


Рис. 7 – Схема процесу МУСТ

Таблиця 6 – Технологічні параметри схеми процесу МУСТ

Технологічний показник	Значення	
Навантаження по мулу, гБСК ₅ /г б. р. добу	0,1–0,2	
Вік мулу, днів	10–30	
Доза мулу, г/л	2–5	
Зони:	Год	%
анаеробна	1–2	9–11
аноксидна	2–4	18–22
аноксидна	2–4	18–22
аеробна	4–12	44–55
Час перебування, год	9–22	
Рецикл мулу, % від витрати	50–100	
Нітратний рецикл, % від витрати	100–600	

Схема JHB

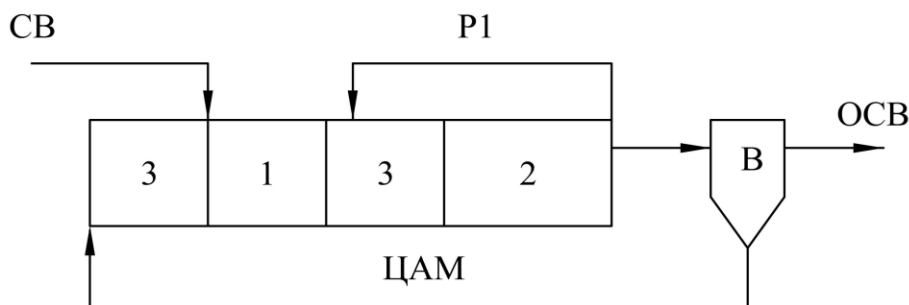


Рис. 8 – Схема процесу JHB

Схема JHB (Johannesburg) [9, 12] показана на рис. 8. Згідно із цією схемою, циркулюючий активний мул подається в аноксидну зону, що розташована перед анаеробною частиною.

В першій аноксидній зоні нітрати відновлюються за рахунок накопичених в мулі забруднень і не заважають вивільненню фосфатів. Як бачимо, ліквідована друга перекачка мулу, що застосовувалась в системі УСТ.

Підтримання мулової суміші в аноксидних і анаеробних зонах розглянутих схем у завислому стані може здійснюватися за допомогою низькооберткових мішалок, барботажу повітрям через дірчасті труби, а також за допомогою різних гідравлічних способів. Для аерації аеробних частин аеротенків застосовують пневматичні, механічні й інші аератори. Крім цього, для підвищення ефекту очищення, коридори аеротенків (або зони очистки) можуть бути об'єднані в так називані “каруселі” [4, 5, 13].

Рекомендації щодо впровадження технології біологічного очищення стічних вод від сполук азоту і фосфору на міських очисних спорудах

При реконструкції аеротенків із впровадженням вищеописаних схем варто враховувати наступні рекомендації:

- час перебування мулу в аеротенку (вік мулу), щоб уникнути вимивання нітрифікуючих організмів, що характеризуються найменшим серед біоценозу споруди приростом, повинен бути більше або, як мінімум, дорівнювати часу ділення контролюючий процес нітрифікації бактерій. Вік мулу для різних умов може змінюватись від 5 до 70 і більше діб;
- для нормального протікання процесу нітрифікації концентрація розчиненого кисню повинна підтримуватися на рівні 3–4 мг/л [11];
- для початку процесу нітрифікації необхідно, щоб концентрація органіки в стічних водах була зменшена до 100 мг БПК₅/л (істотно процес проявляється при концентрації ≤ 20 мг БСК₅/л) [11];
- для нормального протікання процесу денітрифікації концентрація розчиненого кисню не повинна перевищувати 0,5 мг/л [3, 11];
- для повноти видалення азоту концентрація забруднень за БПК повинна бути приблизно в чотири рази вище нітратного азоту [17]. У процесі денітрифікації можуть окислятися різні органічні речовини, зокрема вуглеводи, органічні кислоти (можуть бути отримані в результаті кислого зброджування осаду), амінокислоти, спирти, смоли й ін. [15]. Як джерело вуглецю можуть бути використані стічні води багатьох підприємств (бажано тих, що не містять амонійного, органічного і білкового азоту), побутові стоки, надлишковий активний мул [2, 3];
- витіснення і наступне надлишкове споживання фосфору починається при концентрації в анаеробній зоні біорозкладальних органічних домішок за ХПК вище 25 мг/л.

Список використаної літератури

1. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод. Учебник для вузов. – М.: АСВ. – 2002. – 704 с.
2. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод. Навчальний посібник. – Рівне: ВАТ “Рівненська друкарня”. – 2003. – 616 с.

3. Яковлев С.В., Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. – М.: Стройиздат. – 1980. – 200 с.
4. Данилович Д.А., Дайненко Ф.А. и др. Удаление биогенных элементов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998, № 8. – С.10–12.
5. Загорский В.А., Данилович Д.А. и др. Опыт промышленного внедрения технологий биологического удаления азота и фосфора // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002, № 12. – С. 21–27.
6. Загорский В.А., Данилович Д.А. и др. Реконструкция аэротенков Люберецкой станции аэрации с внедрением технологии нитри–денитрификации // Водоснабжение и санитарная техника. – 1999, № 10. – С. 28–31.
7. Щетинин А.И. Особенности реконструкции городских очистных сооружений канализации в настоящий период // Вода и экология. – 2002, № 2. – С. 22–28.
8. Васильев Б.В., Мишуков Б.Г. и др. Технологии биологического удаления азота и фосфора на станциях аэрации // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001, № 5. – С. 22–25.
9. Wentzel M.C., Ekama G.A., Marais G.v.R. Process and modeling of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems – a review // Wat. Sci. Tech. – 1992, vol. 25, № 6. – p.59–82.
10. Эпов А.Н., Савельева Л.С. Перспективы достижения современных нормативов качества очищенных сточных вод по концентрациям биогенных элементов // Современные методы очистки сточных вод и обработки осадков. – М.: МГП «Мосводоканал». – 1996. – С. 60–73.
11. Олейник А.Я., Тетеря А.И. Моделирование процессов удаления азота из сточных вод на малогабаритных установках биологической очистки // Прикладная гидротехника. – 2001, т. 3(75), № 3. – С. 59–65.
12. Василенко О.А., Поліщук О.В. Аналіз схем біологічної очистки стічних вод від сполук азоту та фосфору в аеротенках // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.:КНУБА. – 2005. – Вип. 4. – С. 74–83.
13. Давиденко О.І., Василенко О.А., Поліщук О.В., Петрова І.Ю. Впровадження технології біологічної очистки стічних вод від з'єднань азоту та фосфору на очисних спорудах Одеського припортового заводу // Збірка доповідей VI міжнародного конгресу «ЕТЕВК-2007». – Ялта. – 2007. – С. 182–185.
14. Londong J / Strategies for optimized nitrate reduction with primary denitrification // Wat/ Sci/ Tech/ – 1992, vol. 26, № 5–6. P.1087–1096.
15. Голубовская Э.К. Биологические основы очистки воды. – М.: ВШ. – 1978. – 272 с.
16. Василенко О.А., Грабовський П.О., Ларкіна Г.М., Поліщук А.В., Прогульний В.Й. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення: Навчальний посібник. – Київ – Одеса, КНУБА, ОДАБА, 2007. – 299 с.
17. ДБН В.2.5–75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіон України, 2013. – 214 с.

Стаття надійшла до редакції 17.02.14 українською мовою

© А.А. Василенко, А.В. Полищук, Л.А. Василенко

**ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД
ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА И ФОСФОРА
НА ГОРОДСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ**

Изучен опыт работы действующих аэротенков, в которых реализованы технологические схемы биологического удаления из сточных вод соединений азота и фосфора. Нарботаны рекомендации для проектирования сооружений с реализацией обозначенных схем.

© O.A. Vasilenko, O.V. Polishchuk, L.O. Vasilenko

**THE APPLYING OF THE TECHNOLOGY OF BIOLOGICAL WASTEWATER
TREATING FROM COMPOUNDS OF NITROGEN AND PHOSPHORUS
IN CITY TREATMENT PLANTS**

The experience of aeration tanks with realized technological schemes of biological removal of compounds of nitrogen and phosphorus from wastewater was explored. Recommendations for the design of treatment plants for the realization of the technological schemes were turned out.