РОЗВИТОК ГІДРОБІОНТІВ НА/У ЗАНУРЕНИХ У СТІЧНУ ВОДУ НОСІЯХ ВІЯ ПРИ ЇЇ ОЧИЩЕННІ ЗА ІНТЕНСИВНОЇ АЕРАЦІЇ

Гвоздяк П.І.¹, Домбровський К.О.², Капарник А.І.³, Рильський О.Ф.²

¹Інститут колоїдної хімії та хімії води імені А.В. Думанського
Національної академії наук України

бул. Академіка Вернадського, 42, 03142, м. Київ
gvozdyak@ukr.net;

²Запорізький національний університет
вул. Жуковського, 66, 69600, м. Запоріжжя
dombrov1717@ukr.net, rylsky@ukr.net;

³Природоохоронне підприємство «Екологія»
вул. Ковпака, 21, 36007, м. Полтава
ecology@poltava.velton.ua

У роботі представлено результати досліджень перифітону волокнистого носія ВІЯ аеротенку очисних споруд. Перифітон досліджували по всій глибині діючого аеротенку за інтенсивної додаткової аерації волокнистого носія. Досліджено структурну організацію перифітону у разі біологічного очищення стічних вод. В угрупованнях перифітону волокнистого носія ВІЯ виявлено 18 нижчих ідентифікованих таксонів (НІТ), що належать до 6 типів водних безхребетних. Загальна щільність перифітону в приповерхневому шарі (від поверхні до 2 м) коливалась у межах 541–2656 тис. ос./м². На глибинних ділянках (3–4 м) аеротенку щільність перифітону була нижчою та коливалась у межах 483–1289 тис. ос./м². Середня біомаса перифітону також зменшувалась із глибиною й у глибинних зонах аеротенку вона була в 4,6 та 2 рази нижчою ніж у приповерхневій зоні у березні та липні відповідно. Встановлено загальну закономірність щодо зниження середньої біомаси перифітонних організмів волокнистого носія із глибиною для 4 виявлених трофічних груп (бактеріо-детритофагів, хижаків, детритофагів та бактеріо-альго-детритофагів). Угруповання перифітону волокнистого носія ВІЯ приповерхневого шару (зони аерації) характеризуються вищою кількістю НІТ, вищими кількісними показниками загальної щільності і біомаси та вищими середніми показниками біомаси трофічних груп ніж угруповання перифітону глибинної зони (3–4 м) аеротенку очисної споруди. Встановлено, що у разі використання занурених у стічну воду регулярних волокнистих носіїв для іммобілізації гідробіонтів сучасні аераційні пристрої повною мірою не забезпечують їх киснем повітря, особливо в нижній частині аеротенку. Таким чином, широко прийнята сучасна тенденція розміщення в аеротенках регулярних носіїв по всьому об'єму реактора, практично аж до дна, здається необґрунтованою і, відповідно, надмірною. *Ключові слова:* перифітон, волокнистий носій, аеротенк, біологічні очисні споруди, масообмін, аерація, стічні води.

Development of hydrobionts on wastewater immediated carriers by its treatment under intensive aeration. Gvozdyak P., Dombrovskiy K., Kaparnyk A., Rylsky O.

This research aims to represent the results of periphyton studies of the fibrous carrier VIYA type of the aeration tank of sewage treatment plants. Periphyton was studied throughout the depth of the operating aeration tank, with intensive additional aeration of the fibrous carrier. The structural organization of periphyton in biological wastewater treatment has been studied. In periphyton groups of the fibrous carrier VIYA, 18 lower identified taxa (LIT) belonging to 6 types of aquatic invertebrates were found. The total density of periphyton in the near-surface layer (from the surface to 2 m) ranged from 541 to 2656 individuals/m². At deep sections (3–4 m) of the aeration tank, the density of the periphyton was lower and fluctuated in the range of 483–1289 thousand individuals/m². The average periphyton biomass also decreased with depth and in the deep zones of the aeration tank, it was 4.6 and 2 times lower than in the near-surface zone, in March and July, respectively. The general regularity concerning decrease in average biomass of periphytonic organisms of the fibrous carrier with depth for 4 revealed trophic groups (bacterio-detritophagous, predators, detritophagous and bacterio-algo-detritophagous) was established. The periphyton groups of the fibrous carrier VIYA of the near-surface layer (aeration zone) are characterized by a higher number of LITs, higher quantitative indicators of total density and biomass and higher average biomass of trophic groups than the periphyton group of the deep zone (3–4 m). It is established that when using regular fibrous carriers immersed in wastewater for immobilization of aquatic organisms, modern aeration devices do not fully provide them with oxygen, especially in the lower part of the aeration tank. Thus, the widely accepted modern trend of placing regular carriers in aeration tanks throughout the reactor volume, almost to the bottom, seems unreasonable and, accordingly, excessive. *Key words:* periphyton, fibrous carrier, aeration tank, biological treatment facilities, mass transfer, aeration, wastewater.

Постановка проблеми. Біологічне очищення стічних вод є натеper чи не найважливішою частиною біотехнології води [1], без якої саме існування сучасної, понад 7-мільярдної людської популяції на Землі просто неможливе.

З-поміж трьох наявних типів біологічного очищення води – анаеробного, аноксичного і аеробного – останній є найбільш поширеним і абсолютно обов'язковим заключним етапом, що забезпечує доведення якості очищення води до найбільш придатної для більшості організмів, включно з Людиною.

Як відомо, будь-яка біотехнологія, у тому числі й біотехнологія води, потребує, по-перше, використання високопродуктивних живих організмів чи біологічних реагентів, і по-друге, забезпечення максимально інтенсивного масообміну між цими організмами (реагентами) та притаманними їм субстратами і метаболітами.

Актуальність дослідження. У разі сучасного аеробного біологічного очищення стічних вод [2] ідеться про пошук і конструювання відповідних біоценозів, здатних швидко споживати (головним чином – окиснювати) розчинені у стоках хімічні сполуки та виїдати з води, що очищається, присутні у ній і таких, що нарастають безпосередньо під час біотехнологічного процесу очищення, гідробіонтів, та про перманентну, надійну доставку до кожного окремого організму у складі цих біоценозів життєво необхідних йому поживних речовин, живих істот і кисню, та інтенсивне відведення від кожного організму продуктів його метаболізму, у тому числі й газів, наприклад, CO_2 , N_2 тощо.

Особливих проблем з доставкою поживних речовин до гідробіонтів – споживачів цих сполук та істот – у разі біологічного очищення стічних вод немає: на відміну від незайманих Людиною частин Біосфери, де звичний, нормальний стан усього живого – це голод, який і забезпечував ще донедавна на подив гідну чистоту води у відкритих природних водоймах, у біологічні очисні споруди постійно, не тільки 7 по 24, а 365(6) днів у рік уже понад століття надходить невичерпний, грандіозний масив їжі, який створює найбільше скупчення організмів, небачений у Природі, неперевершений вир Життя. Єдине, чого там катастрофічно бракує, – окиснювача, тобто кисню.

За правильного підбору складу гідробіонтів на різних етапах біологічного очищення стоків (у «біоконвеєрі» [2]) не повинно виникати проблем і з прибиранням (масообміном) метаболітів: у природно сформованому угрупованні організмів продукти обміну одних з них обов'язково приналежать споживачів цих продуктів – субстратів інших гідробіонтів.

Що ж до газових метаболітів, то їх асиміляція на місці виникнення (*in situ*) не настільки успішна, щоби на неї покладатися, і їх механічне відділення від організму певною мірою сприяло б підвищенню його продуктивності, однак цією обставиною можна нехтувати, бо швидко зростаючі бульбашки газо-

вих метаболітів пробиваються крізь біоплівку, розрихлюють її та навіть відривають, регенеруючи таким чином окремі ділянки волокон носія ВІЯ для оновленого поселення на них свіжих, молодих, активних очисників води.

Отже, найбільш проблемним і технологічно складним завданням аеробного біологічного очищення стічних вод є забезпечення всіх і кожного з аеробних гідробіонтів киснем.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Як стверджує, посилаючись на В.І. Вернадського, академік НАН України В.Д. Романенко [3, ст. 298], «боротьба за існування в гідросфері – це боротьба за кисень». Про «дефіцит розчиненого у воді кисню ... в озерах у межах Києва» йдеться в недавніх дослідженнях співробітників Інституту гідробіології НАНУ [4; 5]. І це при тому, що концентрація органічних речовин у цих водах у десятки і сотні разів менша, ніж у стічних водах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основою для роботи є наукові статті Ю.П. Зайцева [6–9] та Б.Г. Александрова [10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується зазначена стаття. До останнього часу дослідження структурної організації організмів перифітону на/у занурених у стічну воду носіях ВІЯ у разі її очищення за інтенсивної аерації в аеротенку очисної споруди на різних глибинах в Україні не проводили. Вивчення такого питання у майбутньому дозволить більш ефективно використовувати біологічний потенціал певних гідробіонтів перифітону у разі біологічного очищення стічних вод та мінімізує витрати на забезпечення функціонування очисних споруд.

Новизна. Вперше вивчена структурна організація гідробіонтів активного мулу, які розвиваються, іммобілізуються, утворюють біоплівку й трофічно утримуються у волокнистому носії ВІЯ у разі занурення останнього на всю глибину діючого аеротенку за інтенсивної додаткової аерації цього носія. Надалі виявлені закономірності розвитку угруповань перифітону залежно від умов аерації дозволять спрогнозувати оптимальний технологічний режим біологічного очищення стічних вод за допомогою іммобілізованих гідробіонтів на волокнистому носії ВІЯ в аеротенку очисної споруди.

Мета роботи – виявити, які саме гідробіонти активного мулу розвиваються, іммобілізуються, утворюють біоплівку й трофічно утримуються у волокнистому носії ВІЯ у разі занурення останнього на всю глибину діючого аеротенку за інтенсивної додаткової аерації цього носія.

Методологічне або загальнонаукове значення. На основі отриманих результатів дослідження можна в майбутньому з'ясувати питання щодо оптимальних підходів до надійного постачання кисню до надзвичайно корисних в аеробній біотехнології води біоплівок, гідробіонтів яких іммобілізовані на волокнистому носії ВІЯ.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили на діючих спорудах з очищення стічних вод КП «Житлово-комунальний комбінат» (далі – ЖКК) с. Терешки Полтавського району Полтавської області. Для цього на виробничій базі Природоохоронного підприємства «Екологія» (м. Полтава) було виготовлено автономний аераційний пристрій (рис. 1). Пристрій складається з дискового гумового диспергатора повітря (аератора) (3) діаметром 230 мм з нижньою подачею повітря (близько 15 дм³/хв) через трубу (4) діаметром 1/2 дюйма, під'єднану до загального трубопроводу зі стисненим повітрям. Безпосередньо над диспергатором (3) прикріплено 1,5 кг волокнистого носія ВІЯ (5) довжиною 4 м, з п'ятьма в'язальними ділянками (6) шириною 30 мм і поплавками (7), прикріпленими (8) до труби подачі повітря (4). Диск (3) з пригрузом (2) розмістили на дні (1) діючого аеротенку у середній (по довжині) його частині, на відстані близько 0,5 м від

Рис. 1. Схема пристрою для вивчення обростання гідробіонтами носія ВІЯ в аеротенку

- 1 – дно аеротенку, 2 – пригруз, 3 – дисковий диспергатор повітря, 4 – труба подачі повітря, 5 – носій ВІЯ, 6 – в'язана ділянка носія ВІЯ, 7 – поплавок, 8 – кріплення носія ВІЯ до труби 4

стінки, протилежної до стінки, вздовж якої майже впритул розміщено два ряди трубчатих полімерних диспергаторів повітря. Густина носія ВІЯ в уявному циліндрі діаметром 250 мм і висотою 4 000 мм над дисковим диспергатором була доволі потужною й сягала понад 6 кг/м³.

Проби перифітону відбирали упродовж березня та липня 2015 року. Температура води в аеротенку очисної споруди в березні становила 20°C, а у липні – 23°C.

Відбір гідробіологічного матеріалу проводили таким чином. У разі відбору проб перифітону у проміжних аналізах пристрій відключали від магістрального трубопроводу зі стиснутим повітрям, припіднімали в працюючому аеротенку і під водою зрізали окремі ворсини волокнистого носія та, не вилучаючи їх із води, переносили до поліетиленового пакета. Потім поліетиленовий пакет вилучали із води та зрізаний субстрат з водою виливали до лотка, де проводили змив організмів перифітону із волокнистого носія. Після чого воду з організмами перифітону переливали до скляної ємності. Зібраний матеріал доставляли до лабораторії у відкритій посудині, де його постійно аерували за допомогою компресора. Такий відбір проб, на жаль, аж ніяк не перешкоджав попаданню в проби приповерхневої води з притаманними їй гідробіонтами і «коригуванню» результатів аналізу. Та все ж загальна закономірність щодо зниження щільності перифітонних організмів волокнистого носія із глибиною для всіх виявлених трофічних груп була встановлена чітко й однозначно [11]. Визначення організмів перифітону проводили за визначниками [12–16]. Підрахунок щільності перифітонних організмів волокнистого носія проводили з урахуванням площі поверхні субстрату й виражали в ос./м² за методикою, яка описана у роботі [17].

Пристрій з носієм ВІЯ відпрацював в аеротенку 19 місяців і двічі (через 6 і 9 місяців від початку експерименту) піддавався дослідженню на наявність, різноманіття та щільність біомаси організмів перифітону [11].

Після завершення експерименту та після того, як пристрій із носієм ВІЯ був повністю витягнутий з аеротенку та розстелений на поліетиленову плівку (підстилку), нами було встановлено, що, по-перше, товщина біоплівки на волокнах помітно збільшувалася з глибиною їх занурення і була максимальною на носії ВІЯ, розташованому безпосередньо над дисковим диспергатором повітря. І по-друге, біоплівка носія ВІЯ з рівня нижче 2–2,5 м від поверхні води була буквально чорного кольору і мала різкий, специфічний запах сірководню. Звісно, в цих місцях біоплівки інші гідробіонти, крім бактерій, практично не зустрічались або зустрічались у невеликій кількості.

У перифітоні волокнистого носія ВІЯ аеротенку очисних споруд ЖКК с. Терешки було виявлено 6 типів безхребетних (Amoebozoa, Ciliophora, Tardigrada, Rotifera, Annelida, Nematelminthes).

Загалом у перифітоні волокнистого носія аеротенку очисних споруд було виявлено 18 нижчих ідентифікованих таксонів (далі – НІТ). Під час аналізу структурної організації перифітону волокнистого носія приповерхневого шару (від поверхні до 2 м) було встановлено, що в березні та липні середня кількість виявлених НІТ перифітону була відповідно на 47% та 27% вищою ніж на глибині 3–4 м. Загальна щільність перифітону в зоні достатньої аерації (приповерхневий шар) коливалась у межах 541–2656 тис. ос./м², тоді як на глибинних ділянках (3–4 м) щільність гідробіонтів була нижчою й коливалась від 483 тис. ос./м² до 1289 тис. ос./м². Загалом значення середньої щільності перифітону на глибині 3–4 м були в 1,3 та 4,5 рази нижчими, ніж у приповерхневому шарі аеротенку в березні та липні відповідно. Подібна тенденція розподілу кількісних показників перифітону з глибиною була виявлена і для біомаси угруповань обростання волокнистого носія. Так, значення середньої біомаси угруповань перифітону глибинних ділянок аеротенку були в 4,6 та 2 рази нижчими порівняно із значеннями середньої біомаси перифітону приповерхневої зони достатньої аерації у березні та липні відповідно. Встановлено загальну закономірність щодо зниження середньої біомаси перифітонних організмів волокнистого носія із глибиною для 4 виявлених трофічних груп (бактеріо-детритофагів, хижаків, детритофагів та бактеріо-альго-детритофагів). Так, середня біомаса перифітонних організмів цих трофічних груп знижувалась від приповерхневого шару до глибинного на 21–70% у березні та на 21–56% у липні. За результатами дослідження можна зробити висновок, що угруповання перифітону волокнистого носія ВІА приповерхневого шару (зони аерації) характеризуються вищою кількістю НІТ, вищими кількісними показниками загальної щільності і біомаси та вищими середніми показниками біомаси трофічних груп ніж угруповання перифітону глибинної зони (3–4 м) аеротенку очисної споруди.

Таким чином, виявилось, що там, де біоплівка на носіїв ВІА омивається найдрібнішими бульбашками повітря з найбільшою концентрацією кисню, існує найпотужніший (найоблігатніший) анаеробіоз. Крім того, надто мілкі (високодисперсні) бульбашки повітря не здатні інтенсивно регенерувати носій, попереджувати надмірний розвиток біоплівки на волокнах, підтримувати її товщину в таких границях, щоби ефективно функціонували всі мікроорганізми, які входять до її складу. Отже, повсюдно прийнята сучасна тенденція розміщення в аеротенках (аеробних біореакторах) регулярних носіїв по всьому об'єму реактора, практично аж до днища, здається необгрунтованою і, відповідно, надмірною.

Складається враження, що потрібно, не гаючись, шукати радикальних технічних (інженерних) змін у підходах до надійного постачання кисню

до надзвичайно корисних в аеробній біотехнології води біоплівкок...

У цьому зв'язку слід, на наш погляд, звернутися до справді революційних ідей та експериментів нашого співвітчизника, геніального гідробіолога Ювеналія Петровича Зайцева, якому ще у шістдесяті роки минулого століття, за його словами, «в якусь мить прийшло осяяння, несподіване розуміння чогось нового в біологічній структурі моря». Так було відкрито «морський нейстон» [6], а нещодавно понад 90-літній, нев'янучий Ювеналій Петрович знову здивував екологів, біологів, звернувши увагу на «порові простори (інтерстиції) морських піщаних пляжів», де «на межі гідросфери з атмосферою та літосферою... відбуваються основні біогеохімічні процеси у біосфері Землі» [7–9].

Приходить чітке усвідомлення того факту, що наявну в аеротенку з носіями систему аж ніяк не можна вважати трифазною – рідина : тверде тіло : газ, – а виключно двофазною – біоплівка : стічна вода, і гідробіонти у стічній воді, що аерується диспергованим повітрям, практично не взаємодіють з бульбашками повітря, які проносяться мимо, не використовують присутнього в них кисню, а задовольняються виключно тою нікчемною його кількістю, що встигає розчинитися у рідкій фазі. Завдання полягає в тому, аби повною мірою залучити до біотехнологічного процесу аеробного очищення води атмосферне повітря як повноцінну, перманентно присутню, постійно діючу третю фазу.

Головні висновки. У разі використання занурених у стічну воду регулярних волокнистих носіїв для іммобілізації гідробіонтів сучасні аераційні пристрої повною мірою не забезпечують їх киснем повітря, особливо в нижній частині аеротенку. Гідробіонти в наявних аеротенках потребують значно кращого, інтенсивного масообміну. Встановлено, що перифітонні угруповання волокнистого носія ВІА аеротенку очисних споруд ЖКК с. Терешки утворено представниками 18 НІТ, що належать до 6 типів водних безхребетних (Amoebozoa, Ciliophora, Tardigrada, Rotifera, Annelida, Nematelminthes). Виявлено загальну закономірність щодо структурної організації та розвитку організмів перифітону з глибиною. Угруповання перифітону волокнистого носія ВІА приповерхневого шару (зони аерації) характеризуються вищою кількістю НІТ, вищими кількісними показниками загальної щільності і біомаси та вищими середніми показниками біомаси трофічних груп ніж угруповання перифітону глибинної зони (3–4 м) аеротенку очисної споруди.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані дані можуть стати підґрунтям для подальших детальних досліджень щодо інтенсифікації процесів біологічного очищення стічних вод в аеротенках (аеробних біореакторах) у разі інтенсивної аерації води.

Література

1. Гвоздяк П.І. Біохімія води. Біотехнологія води : автомонографія. Київ, 2019. 228 с.
2. Гвоздяк П.І. За принципом біоконвеєра. Біотехнологія охорони довкілля. *Вісник НАН України*. 2003. № 3. С. 29–36.
3. Романенко В.Д. Основы гидроэкологии. Киев : Генеза. 2004. 664 с.
4. Старосила С.В. Мікробіологічні процеси деструкції органічної речовини у воді озер у межах м. Києва. *Гідробиол. журн.* 2020. Т. 56. № 6. С. 56–64.
5. Жежеря В.А., Линник П.Н., Белоус Е.П. Улучшение гидрохимического режима малых водоемов урбанизированных территорий в условиях искусственной аэрации (на примере озера Тельбин). *Гидробиол. журн.* 2019. Т. 55. № 2. С. 101–120.
6. Зайцев Ю.П. Створення «дерева нових знань» у галузі біології та екології моря. *Вісник НАН України*. 2017. № 4. С. 61–72.
7. Зайцев Ю.П. Сообщество микроорганизмов поровых вод песчаных пляжей Черного моря. Факты и гипотезы. *Мікробіологія і біотехнологія*. 2008. № 2. С. 8–19.
8. Зайцев Ю.П. О контурной структуре гидросферы. *Гидробиол. журн.* 2015. Т. 51. № 1. С. 3–27.
9. Зайцев Ю.П. Крайовий ефект у морських екосистемах. *Наукові записки Терноп. нац. пед. ун-ту. Серія «Біологія»*. 2010. № 3 (44). С. 94–97.
10. Александров Б.Г. Сучасні уявлення про контурну структуру водного середовища та нові підходи для його моніторингу. *Вісник НАН України*. 2017. № 12. С. 42–49.
11. Домбровський К.О., Гвоздяк П.І. Перифітон волокнистого носія «ВІЯ» аеротенку очисних споруд. *Вісник Запорізького нац. ун-ту : збірник наукових праць. Біологічні науки*. 2018. № 1. С. 76–83.
12. Foissner W., Blatterer H., Berger H., Kohmann F. Taxonomische und ökologische Revision der Ciliaten des Saprobien systems. Band I: Cyrtophorida, Oligotrichida, Hypotrichia, Colpodea. *Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft*. 1991. № 1/91. 478 p.
13. Foissner W., Berger H., Kohmann F. Taxonomische und ökologische Revision der Ciliaten des Saprobien systems. Band II: Peritrichia, Heterotrichida, Odontostomatida. *Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft*. 1992. № 5/92. 502 p.
14. Foissner W., Berger H., Kohmann F. Taxonomische und ökologische Revision der Ciliaten des Saprobien systems. Taxonomische und ökologische Revision der Ciliaten des Saprobien systems. Band III: Hymenostomata, Prostomatida, Nassulida. *Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft*. 1994. № 1/94. 548 p.
15. Foissner W., Berger H., Blatterer H., Kohmann F. Taxonomische und ökologische Revision der Ciliaten des Saprobien systems. Band IV: Gymnostomatea, Loxodes, Suctoria. *Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft*. 1995. № 1/95. 540 p.
16. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Зоопланктон. Санкт-Петербург–Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2010. Т. 1. 495 с.
17. Домбровський К.О., Рильський О.Ф., Гвоздяк П.І. Структурна організація перифітону волокнистого носія «ВІЯ» при очищенні зливових вод від нафтопродуктів. *Гідробиол. журн.* 2020. Т. 56. № 1. С. 94–105.