Innov Biosyst Bioeng, 2018, vol. 2, no. 1, 64–70
doi: 10.20535/ibb.2018.2.1.130346
UDC 628.16:579.222

БІОЛОГІЧНА НІТРИФІКАЦІЯ-ДЕНІТРИФІКАЦІЯ У ПРОЦЕСІ ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ ВОДИ: СУЧАСНИЙ СТАН І ОСНОВНІ БІОЛОГІЧНІ АГЕНТИ

О.В. Кравченко[1], О.С. Панченко[1]*, В.В. Мотроненко[2], Є.Я. Смілянець[2]

[1]Державне підприємство "Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства", Київ, Україна
[2]КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Corresponding author: elena.panchenko.92@gmail.com

Received 6 March 2018; Accepted 5 April 2018

Проблематика. Сполуки нітрогену належать до одних із поширених забруднювачів підземних вод України. Високий вміст нітратів у питній воді становить загрозу для здоров'я населення (викликає метгемоглобінемію в дітей). Сполуки амонію не мають прямого впливу на здоров'я населення, проте встановлено їх можливий вплив на органолептичні показники питної води (смак і запах), на процес знезараження води та на появу нітритів у системах розподілення води. Тому актуальним є вивчення та пошук можливих шляхів застосування біотехнологічних методів видалення сполук нітрогену із питної води аналогічно до процесів, які відбуваються під час очищення стічних вод.

Мета. Метою роботи є огляд сучасних технологій видалення нітрогенвмісних сполук із питної води та систематизація біологічних агентів, які використовуються під час цього процесу, для оцінки перспективи застосування біотехнологічних методів видалення нітрогенвмісних сполук на вітчизняних підприємствах водопостачання та водовідведення.

Методика реалізації. Дослідження сучасного стану біологічної нітрифікації-денітрифікації під час очищення питної води проведено шляхом огляду наукової літератури за напрямом застосування сучасних біотехнологічних методів нітрифікації-денітрифікації питної води.

Результати. Проведений аналіз показав, що для гетеротрофного процесу необхідна наявність джерела вуглецю, для автотрофного – дослідження з пошуку оптимального донора електронів.

Висновки. Для широкого застосування біофільтрів для видалення нітрогенвмісних сполук із питної води необхідно шукати шляхи вдосконалення їх роботи заміною біологічного агента, інтенсифікацією процесів нітрифікації-денітрифікації, використанням мутантних штамів мікроорганізмів, виділених із завантаження працюючих фільтрів.

Ключові слова: нітрогенвмісні сполуки; питна вода; нітрифікація; денітрифікація; біотехнології видалення нітрогеновмісних сполук.

Вступ

Сполуки нітрогену належать до одних із поширених забруднювачів підземних вод України. Солі амонію є природними компонентами підземних вод, підвищений вміст яких спостерігається у Хмельницькій області. Нітрати мають переважно антропогенне походження і зустрічаються в тих областях, де активно розвивається сільське господарство. Їх вміст перевищено у Дніпропетровській, Одеській, Херсонській, Черкаській областях [1].

Основні джерела забруднення нітратами питної води – це неконтрольоване використання нітратних добрив у сільському господарстві, неправильне захоронення небезпечних відходів, надлишок токсичних речовин на сміттєзвалищах.

Високий вміст нітратів у питній воді становить загрозу для здоров'я населення. Нітрати, перетворюючись в організмі на нітрити, можуть викликати метгемоглобінемію в дітей. Згідно з четвертим виданням Керівництва із забезпечення якості води ВООЗ (Всесвітньої організації охорони здоров'я), сполуки амонію не мають прямого впливу на здоров'я населення, проте встановлено їх можливий вплив на органолептичні показники питної води (смак і запах), на процес знезараження води, на появу нітритів у системах розподілення води.

У Директиві Ради Європейського Союзу 98/83/ЄС «Про якість води, призначеної для споживання людиною» параметричне значення для амонію в питній воді встановлено на рівні 0,5 мг/л, для нітратів – 50 мг/л, для нітритів – 0,5 мг/л. В Україні згідно з чинними ДСанПіН 2.2.4.171–10 вміст амонію встановлено на рівні 0,5 (2,6) мг/дм^3, нітратів – 50 мг/дм^3, нітритів – 0,5 (0,1) мг/дм^3 (нормативи, зазначені в дужках, можуть встановлюватись для певних умов).

© The Publisher 2018. Published by Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
This is an Open Access article distributed under the terms of the license CC BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits re-use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Автори, що ведуть дослідження в цій галузі, пропонують видалення нітратів із підземних вод за допомогою зворотного осмосу, електродіалізу [2], каталітичним способом [3], з використанням природних сорбентів [4, 5]. Основні недоліки цих методів – складність у масштабуванні, виділення небезпечних речовин (у випадку каталітичного способу) та висока вартість процесу (у випадку електродіалізу) [2–5].

Тому все більше дослідників звертається до біотехнологічних методів видалення амонію із питної води аналогічно до застосування при очищенні стічних вод.

Нині в Україні біофільтри для видалення сполук азоту практично не застосовуються у зв'язку з технологічними труднощами, невисокою ефективністю роботи та значними експлуатаційними витратами.

Метою роботи є огляд сучасних технологій видалення нітрогенвмісних сполук із питної води та систематизація біологічних агентів, які використовуються під час цього процесу, для оцінки перспективи застосування біотехнологічних методів видалення нітрогенвмісних сполук на вітчизняних підприємствах водопостачання та водовідведення.

Біотехнологічні підходи до очищення води від нітрогенвмісних сполук

Процес біологічного видалення сполук амонію з питної води передбачає два етапи: перетворення амонію на нітрат (нітрифікацію) і подальше перетворення нітратів на газ азоту (денітрифікацію). На сьогодні пропонуються кілька підходів до здійснення цього процесу: автотрофна і гетеротрофна нітрифікація-денітрифікація та декілька комбінованих біолого-електрохімічних методів [6, 7]. Усі вони мають свої переваги і недоліки та придатні для очищення води за різних умов.

Процес біологічної нітрифікації-денітрифікації питної води може відбуватись як гетеротрофним, так і автотрофним шляхом.

Гетеротрофна нітрифікація-денітрифікація. Гетеротрофна нітрифікація-денітрифікація широко застосовується при видаленні нітратів зі стічних вод, якщо наявна достатня кількість органічного вуглецю. Традиційною технікою є додавання водорозчинних речовин, таких як метанол, етанол, оцтова кислота і глюкоза. Проте існують ризики погіршення якості стоків, вони пов'язані з недостатньою кількістю сировини або її надлишком. Деякі рідкі джерела вуглецю, такі як метанол і етанол, становлять небезпеку під час зберігання, транспортування та експлуатації, оскільки є токсичними. Тому під час гетеротрофної денітрифікації важливим є комплексне управління процесом і безперервний моніторинг [8].

При очищенні питної води недостатня кількість органічного вуглецю може обмежувати застосування гетеротрофної денітрифікації. Нині проводять дослідження, спрямовані на пошук оптимального та найбільш економічно вигідного джерела вуглецю. Так, у роботах [8–10] досліджується використання цукрів, рослинної сировини і синтетичних полімерів.

Авторами праці [8] запропоновано застосування промислового білого цукру як донора електронів і джерела вуглецю. Зазначається, що використання цукру є більш економічно вигідним, ніж вторинної рослинної сировини, оскільки остання потребує додаткової обробки, що здорожчує процес.

Процес, у якому як джерело вуглецю використовують тверду сировину, називається твердофазовою нітрифікацією-денітрифікацією. Є два типи твердих джерел вуглецю, доступних для твердофазової денітрифікації: натуральні рослиноподібні матеріали та синтетичні біодеструктивні полімери.

Натуральні матеріали, такі як стружка, солома та бавовна, є дешевшими й доступними. Проте вони мають високий рівень вивільнення розчиненого органічного вуглецю.

У дослідженні [10] випробувано декілька видів рослинної сировини як джерела вуглецю для біологічної денітрифікації питної води: залишки деревних матеріалів – сосни й тополі, бавовну, стебла очерету, лакрицю, корицю та ін. Найбільш вдалим джерелом вуглецю в процесі гетерогенної нітрифікації-денітрифікації, згідно з результатами проведених досліджень, є *Gracilaria verrucosa* (грацилярія бородавча) [10].

Біодеградуючі полімери, у т.ч. полігідроксиалканоати, полігідроксибутират, полікапролактон, полібутиленсукцинат та полімілова кислота, є кращими джерелами вуглецю для денітрифікації внаслідок низького рівня вивільнення розчиненого органічного вуглецю, однак вони є високовартісними [9].

У дослідженнях [11–13] розглядається мікроорганізм *Acinetobacter sp.* Цей вид бактерій здатен до автотрофної та гетеротрофної нітрифікації за різних умов.

У роботі [13] досліджували здатність до гетеротрофної нітрифікації *Acinetobacter sp.* SFA 10,

ізольованого з річкової води. Автори проводили ПЛР (полімеразна ланцюгова реакція) аналіз геному мікроорганізму, а повноту нітрифікації визначали за допомогою спектрофотометрії зразків води. В результаті визначено, що температурний оптимум дії *Acinetobacter sp.* SFA 10 – 5 °C. Швидкість видалення амонію становить 2,05 мг NH_4^+/год, за початкової концентрації амонію 5 мг/л. Коли концентрація підвищувалась до 45 мг/л, швидкість видалення амонію знижувалась.

Нітрифікація *Acinetobacter sp.* SFA 10 відбувається за допомогою ферментів монооксигенази аміаку (МОА) та гідроксиламін-оксидази (ГАО).

Результати дослідження продемонстрували, що *Acinetobacter sp.* окиснює амоній до NH_2OH, який потім перетворюється на нітрат. Здатністю до денітрифікації цей штам не характеризується.

У [12] досліджували *Acinetobacter sp.* HITLi7, здатний до гетеротрофної нітрифікації при 2 °C. Для прогнозування показників зниження амонію в питній воді за низької температури кінетика штамів HITLi7 досліджувалася за допомогою кінетичних моделей Моно. Результати показали, що спорідненість HITLi7 до амонію була вищою за наявності достатньої кількості джерела вуглецю. Максимальна швидкість видалення амонію становила 0,18 мг NH_4^-/л/год за співвідношення C/N від 10.

Автори [14] зазначають, що деякі гетеротрофні нітрифікуючі бактерії, такі як *Pseudomonas sp.*, *Alcaligenes faecalis*, *Acinetobacter sp.*, *Bacillus subtilis*, *Rhodococcus sp.*, *Agrobacterium sp.*, *Microbacteria sp.* і *Klebsiella pneumoniae*, можуть видалити амоній через перетворення на N_2 та/або N_2O. *Acinetobacter sp.* Y16 і *Microbacterium sp.* SFA13 здатні видаляти амоній у низьких концентраціях (<5 мг/л) при 2 і 5 °C. *Acinetobacter sp.* HA2 і *Pseudomonas stutzeri* YZN-001 можуть видалити амоній у концентрації 100 мг/л при 10 °C.

Також авторами повідомляється, що деякі гетеротрофні нітрифікатори, зокрема *Pseudomonas stutzeri* YZN-1001, здатні виконувати одночасну гетеротрофну нітрифікацію та аеробну денітрифікацію. Штам може одночасно виконувати гетеротрофну нітрифікацію та аеробну денітрифікацію, використовуючи амоній як єдине джерело азоту при 8 °C. *Pseudomonas stutzeri* YZN-1001 може перетворювати амоній на N_2 без утворення нітритів і нітратів. Проте накопичення нітритів і нітратів спостерігалося під час процесу вилучення амонію за допомогою *Rhodococcus sp.* CPZ24, а нітрит був домінуючим продуктом нітрифікації для *Bacillus methylotrophicus* L7, *Marinobacter sp.* F6 і *Klebsiella pneumoniae* CF-S9. У цьому дослідженні кінцевим продуктом після деградації амонію були N_2, внутрішньоклітинний азот, та NO_3^-, NO_2^- та N_2O у слідових кількостях.

Автотрофна нітрифікація-денітрифікація. Основні проблеми, що постають перед дослідниками процесу автотрофної денітрифікації, – пошук оптимального донора електронів та інтенсифікація процесу за рахунок підбору ефективної конструкції біофільтрів [6, 7, 11, 15, 17, 18].

Для здійснення автотрофної нітрифікації використовують 2 джерела донорів електронів: газоподібний водень та елементарну сірку. Вони безпечні для здоров'я людини і не потребують подальших кроків, щоб видалити надлишок субстрату або його похідні [6].

Автотрофні мікроорганізми, як наприклад *Micrococcus denitrificans*, розщеплюють нітрат до нітриту й азоту за рахунок окиснення водню до води.

Реакція перебігає за такою схемою:

$$\text{I.} \quad 2NO_3^- + 2H_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O.$$

$$\text{II.} \quad 2NO_2^- + 2H_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O + 2OH^-.$$

Підвищення pH відбувається починаючи з кроку II. Різні газоподібні оксиди азоту є проміжними сполуками стадії II. Загальна реакція може бути записана у вигляді

$$\text{III.} \quad 2NO_3^- + 5H_2 \rightarrow N_2 + 4H_2O + 2OH^-.$$

Властивості H_2, а саме те, що він є простою речовиною, слаборозчинною у воді (1,6 мг/л при 20 °C), роблять його добрим реагентом для біологічного процесу денітрифікації. Водень відзначається як свого роду чистий донор електронів для автотрофної денітрифікації, однак його транспортування та генерація небезпечні й дорогі. Ще одним недоліком цього методу є те, що, як правило, автотрофні організми відносно повільно ростуть [15].

У роботі [16] досліджено ефективність автотрофної денітрифікації із застосуванням сірки як джерела вуглецю. Процес проводили з використанням мембранного біореактора (МБР). Автори зазначають, що біореактори, робота яких ґрунтується на використанні сірки, можуть усунути проблеми, пов'язані з іншими типами

МБР, оскільки процес виключає додавання органічного вуглецю. Крім того, сірка є дешевим і легкодоступним джерелом електронів, а забруднення очищеної води мікроорганізмами усувається мембранною фільтрацією.

У процесі елементарна сірка та нітрат діють як донор електронів і акцептор відповідно до реакції

$$55S^0 + 50NO_3^- + 38H_2O + 20CO_2 + 4NH_4^+ \rightarrow$$
$$\rightarrow 4C_5H_7O_2N + 55SO_4^{2-} + 25N_2 + 64N^+.$$

Основними недоліками процесу є утворення сульфату та кислоти. Але її легко нейтралізувати додаванням вапняку або бікарбонату.

Авторам дослідження вдалося досягти повного видалення нітратів із питної води досліджуваним методом.

Серед автотрофних мікроорганізмів сьогодні активно досліджується нітрифікація-денітрифікація за участі біоценозу архебактерій [17], *Acinetobacter sp.* SZ28 [11], *Nitrospira spp.* [18], *Micrococcus denitrificans* [15] та ін. У роботі [17] було досліджено консорціум нітрифікуючих архебактерій у зразках очищеної на біофільтрах питної води. Ідентифікація проводилася за допомогою ПЛР. Показано, що в консорціумі переважають метаногенні організми, які належать до виду *Euryarchaeota*. Домінуючими мікроорганізмами виявились *Methanobacterium alcaliphilum* і *Methanobacterium flexile*. У декількох зразках низькочастотними були виявлені клони *Methanospirillum hungatei*.

Крім архебактерій, було виявлено *Nitrosomonas oligotropha*, *Nitrosopumilus maritimus* та *Nitrospiramos coviensis*, *Candidatus Nitrospira defluvii*. Зазначається, що фактори середовища, такі як pH, рівень кисню, сумарний вміст неорганічного азоту, температура, мали важливий вплив на загальний склад бактеріального й архебактеріального консорціуму.

У дослідженні [11] продемонстровано здатність мікроорганізмів роду *Acinetobactersp.* SZ28 до здійснення автотрофної денітрифікації.

Механізм видалення азоту штамом SZ28 визначали за допомогою вимірювання концентрації газоподібного азоту в середовищі. Аналіз показав, що максимальна деградація нітратів була досягнута за концентрації Mn_2^+ як донора електорів 143,56 мг/л, співвідношення C/N 6,82, вихідного pH 5,17 і температури від 34,26 °C. Вміст нітратів у воді при їх обробці *Acinetobacter sp.* SZ28 знизився з 1,63 мг/л до слідової кількості.

Комбіновані фізико-біологічні методи денітрифікації. Крім інтенсифікації процесу денітрифікації за допомогою розробки оптимальної конструкції фільтра та підбору режимів фільтрування, низка дослідників, наприклад [6], вивчають інтенсифікацію за допомогою комбінування методу автотрофної денітрифікації та електрохімічних методів.

У дослідженні [6] сформовано та випробувано комбінований біоелектрохімічний і автотрофний процес денітрифікації з використанням сірки для очищення питної води.

Авторами був сконструйований біореактор, у верхній частині якого проходили біоелектрохімічні процеси, а в нижній – біологічна денітрифікація.

H^+, що виділяється внаслідок розкладання сірки у верхній частині реактора, використовується для біолектрохімічної денітрифікації водню на катоді. З іншого боку, оскільки H^+, що виробляється при денітрифікації сірки, споживається в процесі біоелектрохімічної денітрифікації водню, то немає необхідності додавати вапняк для підтримки рівня pH.

Авторами також досліджено склад біоплівки мікроорганізмів, основним представником була бактерія *Thiobacillus denitrificans*.

Низка авторів показують можливість використання комбінованої автотрофної/гетеротрофної денітрифікації. Наприклад, у дослідженні [7] пропонується новий підхід до гетеротрофної/автотрофної денітрифікації (ГАД) за симбіотичним співвідношенням гетеротрофних та автотрофних процесів денітрифікації, підтримуваних бавовною як гетеротрофним джерелом живлення та нульвалентним залізом. Основною функцією нульвалентного заліза в системі є зменшення розчиненого кисню, сприяння гетеротрофній денітрифікації відповідно до рівнянь

$$2Fe(0) + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4OH^- + 2Fe^{2+},$$
$$Fe(0) + 2H_2O \rightarrow H_2 + Fe^{2+} + 2OH^-.$$

Після проходження гетеротрофного процесу виділяється водень, що підтримує автотрофну денітрифікацію відповідно до рівняння

$$5H_2 + 2NO_3^- \rightarrow N_2 + 4H_2O + 2OH^-.$$

Безперервні випробування показали, що реактори ГАД були більш ефективними, ніж реактор, де здійснювалася лише гетеротрофна денітрифікація. Коефіцієнт видалення нітратів комбінованого реактора на 46 % вищий, ніж у гетеротрофному реакторі. Недоліком цього ме-

тоду автори визначають осідання заліза на обладнанні, утворення так званої "зеленої іржі". Проте процес накопичення іржі вдалося зменшити, використовуючи більш короткий процес експлуатації біофільтра. Автори зазначають, що цей спосіб очистки питної води є перспективним, тому що продуктивність такого біофільтра є більшою порівняно з гетеротрофним і автотрофним процесами окремо.

Видалення сполук нітрогену з питної води за допомогою пробіотичних бактерій. Автори [8, 19] досліджують процес денітрифікації питної води за допомогою пробіотичних бактерій. Зазначається, що основними недоліками біологічної денітрифікації є проблема забруднення води біологічними денітрифікуючими агентами, а також технологічні складнощі іммобілізації бактерій на носіях. Досліджено процес очистки води від сполук нітрогену з використанням таких біологічних агентів: *Bacillussubtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Lactobacillus acidophilus*, *L. bifidus*, *L. bulgaricus i Streptococcus thermophilus.*

Культури біологічних агентів були іммобілізовані на завантаженнях фільтра. В результаті авторами доведено, що пробіотичні бактерії успішно здійснюють денітрифікацію води. Так, концентрація нітратів у воді до пропускання через фільтр становила 300–500 мг KNO_3 в 1 $дм^3$ води; після пропускання води через фільтр рівень нітритів становив менше 2,5 мг/$дм^3$ (норматив за ДСанПін для питної води становить не більш ніж 0,5 мг/$дм^3$).

У ході роботи авторами було виявлено технологічні проблеми при масштабуванні процесу. З'ясувалося, що газ, який утворюється в результаті денітрифікації безпосередньо в місцях, де знаходяться іммобілізовані бактерії, тобто в тілі фільтра, сприяє осадженню завантаження, ускладнює проходження води крізь піщані та вугільні фільтри. Цей недолік не вдалося виправити зміною конструкції фільтра або перемішуванням.

Видалення сполук нітрогену з питної води за допомогою грибів. Автори [20] повідомляють про те, що низка грибів, наприклад *Fusarium oxysporum*, *Cylindrocarpon tonkinense*, *Fellomyces fuzhouensis*, *F. oxysporum*, *Penicillium sp.* [9] денітрифікує NO_3^- до газоподібного N_2O. Проте на сьогодні не наведено вагомих результатів досліджень з використання грибів як біологічного агента для очищення питної води.

У таблиці наведено біологічні агенти, які використовуються під час нітрифікації-денітрифікації питної води.

Таблиця: Біологічні агенти, що використовуються при нітрифікації-денітрифікації питної води

Процес	Біологічні агенти
Гетеротрофна нітрифікація-денітрифікація	*Alcaligenes faecalis*, *Acinetobacter sp.*, *Bacillus sp.*, *Diaphorobacter sp.*, *Microbacterium sp.*, *Providencia rettgeri*, *Pseudomonas stutzeri*, *Rhodococcus sp.* [14]
Гетеротрофна/автотрофна нітрифікація-денітрифікація	*Pseudomonas sp.*, *Alcaligenes faecalis*, *Acinetobacter sp.*, *Bacillus subtilis*, *Rhodococcus sp.*, *Agrobacterium sp.*, *Microbacteria sp.*, *Klebsiella pneumonia* [14], *Acinetobacter sp.* [11–13]
Автотрофна нітрифікація-денітрифікація	*Micrococcus denitrificans* [14], *Acinetobacter sp.*, *Methanobacterium alcaliphilum*, *Methanobacterium flexile*, *Candidatus Nitrospira defluvii* [17], *Nitrospira spp.* [18], *Thiobacillus denitrificans* [6]
Денітрифікація за допомогою пробіотичних бактерій	*Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Lactobacillu sacidophilus*, *L. bifidus*, *L. bulgaricus*, *Streptococcus thermophilus* [8, 19]

Висновки

Проведено огляд сучасних біотехнологічних методів нітрифікації-денітрифікації питної води. Розглянуто особливості автотрофного/гетеротрофного процесу та біологічні агенти, що їх здійснюють. Автотрофний і гетеротрофний процеси характеризуються різними перевагами та недоліками. Так, для гетеротрофного процесу необхідна наявність джерела вуглецю. Тому більшість робіт спрямовані на пошук оптимального джерела вуглецю, який би повністю споживався мікроорганізмами та не утворював шламів після очистки. Перевагою гетеротрофного процесу є його швидкість і можливість проведення очистки за низьких температур (+2–+5 °C).

В області автотрофного процесу ведуться дослідження з пошуку оптимального донора

електронів. На сьогодні досліджено сірку, водень і манган як джерела електронів.

Для широкого застосування біофільтрів з метою видалення нітрогенвмісних сполук необхідно шукати шляхи вдосконалення їх роботи, наприклад заміною біологічного агента, інтенсифікацією процесів нітрифікації-денітрифікації, використанням мутантних штамів мікроорганізмів, виділених із завантаження працюючих фільтрів. Для подальших експериментальних досліджень планується виділення із завантаження працюючих фільтрів мікроорганізмів, здатних до нітрифікації-денітрифікації питної води.

References

[1] Prokopov VO. Drinking water in Ukraine: Medico-ecological and sanitary-hygienic aspects. Kyiv: VSV "Medicina"; 216. 400 p.

[2] Sahli MAM, Tahaikt M, Achary I, Taky M, Elhanouni F, Hafsi M, et al. Technical optimisation of nitrate removal from ground water by electrodialysis using a pilot plant. 2004 Aug;167:359. DOI: 10.1016/j.desal.2004.06.146

[3] Sharma S, Bhattacharya A. Drinking water contamination and treatment techniques. Appl Water Sci. 2017 June;7;3:1043-67. DOI: 10.1007/s13201-016-0455-7

[4] Basaraba YuB, Zasadnyi TM. Prospects for the use of zeolites of the axillary deposit for the purification of natural water. Sci Tech J. 2015;1:46-51.

[5] Malovanii MS, Martynyak OV, Sakalova GV, Chernomaz N, Sibirniy AV, Krehovetsky OM. Study of ecological and technological aspects of purification of drinking water from ammonium ions by natural disperse sorbents. Ecol Industry. 2011;1:47-51.

[6] Wang H, Qu J. Combined bio electrochemical and sulfur autotrophic denitrification for drinking water treatment. Water Res. 2003 Sept; 37(15):3767-75. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00249-5

[7] Della Rocca C, Belgiorno V, Meriç S. An heterotrophic/autotrophic denitrification (HAD) approach for nitrate removal from drinking water. Process Biochem. 2006;41(5):1022-8. DOI: 10.1016/j.procbio.2005.11.002

[8] Karanasios K, Vasiliadou I, Tekerlekopoulou A, Akratos C, Pavlou S, Vayenas D. Effect of C/N ratio and support material on heterotrophic denitrification of potable water in bio-filters using sugar as carbon source. Int Biodeterioration Biodegradation. 2016;111:62-73. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.04.020

[9] Wang J, Chu L. Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process. Biotechnol Adv. 2016 Nov;34(6):1103-12. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2016.07.001

[10] Ovez B. Batch biological denitrification using *Arundo donax*, *Glycyrrhiza glabra*, and *Gracilaria verrucosa* as carbon source. Process Biochem. 2006 June;41(6):1289-95. DOI: 10.1016/j.procbio.2005.12.030

[11] Su J, Zheng S, Huang T, Ma F, Shao S, Yang S, et al. Characterization of the anaerobic denitrification bacterium *Acinetobacter* sp. sz28 and its application for ground water treatment. Biores Technol. 2015 Sept;192:654-9. DOI: 10.1016/ j.biortech.2015.06.020

[12] Qin W, Li W, Zhang D, Huang X, Song Y. Ammonium reduction kinetics in drinking water by newly isolated *Acinetobacter* sp. HITLi 7 at low temperatures. Des Water Treatment. 2016;57(24):11275-82. DOI: 10.1080/19443994.2015.1043649

[13] Zhang DY, Li WG, Gong XJ, Wang P. Ammonium removal from drinking water by *Acinetobacter* sp. SFA 10 at low temperature. In: Zhu L, Ouadha A, editors. Sustainable Development. Proceedings of the 2015 International Conference on Sustainable Development; 2016; Wuhan. P. 736-45. DOI: 10.1142/9789814749916_0077

[14] Zhang S, Sha C, Jiang W, Li W, Zhang D, Li J, et al. Ammonium removal at low temperature by a newly isolated heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium *Pseudomonas fluorescens* wsw-1001. Environ Technol. 2015;36(19):2488-94. DOI: 10.1080/09593330.2015.1035759

[15] Kurt M, Dunn IJ, Bourne JR. Biological denitrification of drinking water using autotrophic organisms with H_2 in a fluidized-bed biofilm reactor. Biotechnol Bioeng. 1987;29(4):493-501. DOI: 10.1002/bit.260290414

[16] Sahinkaya E, Yurtsever A, Aktaş Ö, Ucar D, Wang Z. Sulfur-based autotrophic denitrification of drinking water using a membrane bioreactor. Chem Eng J. 2015 May;268:180-6. DOI: 10.1016/j.cej.2015.01.045

[17] Nagymáté Z, Homonnay ZG, Márialigeti K. Investigation of Archaeal and Bacterial community structure of five different small drinking waternetworks with special regard to the nitrifying microorganisms. Microbiol Res. 2016;188-189:80-9. DOI: 10.1016/j.micres.2016.04.015

[18] Daims H, Lebedeva E, Pjevac P, Han P, Herbold C, Albertsen M, et al. Complete nitrification by Nitrospira bacteria. Nature. 2015;528(7583):504-9. DOI: 10.1038/nature16461

[19] Gvozdyak PI, Sapyra OV. Denitrification of drinking water by using probiotic bacteria. Microbiol Biotechnol. 2017;2:81-9. DOI: 10.18524/2307-4663.2017.2(38).105022.

[20] Takaya N. Dissimilatory nitrate reduction metabolisms and their control in fungi. J Biosci Bioeng. 2002;94(6):506-10. DOI: 10.1016/S1389-1723(02)80187-6

А.В. Кравченко, Е.С. Панченко, В.В. Мотроненко, Е.Я. Смилянец

БИОЛОГИЧЕСКАЯ НИТРИФИКАЦИЯ-ДЕНИТРИФИКАЦИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ АГЕНТЫ

Проблематика. Соединения азота относятся к одним из распространенных загрязнителей подземных вод Украины. Высокое содержание нитратов в питьевой воде представляет угрозу для здоровья населения (вызывает метгемоглобинемию у детей). Соединения аммония не имеют прямого влияния на здоровье населения, однако установлено их возможное влияние на органолептические показатели питьевой воды (вкус и запах), на процесс обеззараживания воды и на появление нитритов в системах распределения воды. Поэтому актуальным является изучение и поиск возможных путей применения биотехнологических методов удаления соединений азота из питьевой воды аналогично тем процессам, которые происходят во время очистки сточных вод.

Цель. Целью работы является обзор современных технологий удаления азотсодержащих соединений из питьевой воды и систематизация биологических агентов, которые используются во время процесса, для оценивания перспективы применения биотехнологических методов удаления азотсодержащих соединений на отечественных предприятиях водоснабжения и водоотведения.

Методика реализации. Исследование современного состояния биологической нитрификации-денитрификации при очистке питьевой воды проведено путем обзора научной литературы по направлению применения современных биотехнологических методов нитрификации-денитрификации питьевой воды.

Результаты. Проведенный анализ показал, что для гетеротрофного процесса необходимо присутствие источника углерода, для автотрофного – исследование по поиску оптимального донора электронов.

Выводы. Для широкого применения биофильтров для удаления азотсодержащих соединений из питьевой воды необходимо искать пути совершенствования их работы заменой биологического агента, интенсификацией процессов нитрификации-денитрификации, использованием мутантных штаммов микроорганизмов, выделенных из загрузки работающих фильтров.

Ключевые слова: азотсодержащие соединения; питьевая вода; нитрификация; денитрификация; биотехнологии удаления азотсодержащих соединений.

O.V. Kravchenko, O.S. Panchenko, V.V. Motronenko, E.Ya. Smelyanets

BIOLOGICAL NITRIFICATION-DENITRIFICATION IN THE DRINKING WATER TREATMENT PROCESS: CURRENT STATUS AND MAIN BIOLOGICAL AGENTS

Background. Nitrogen compounds are one of the most common pollutants of groundwater in Ukraine. The high content of nitrates in drinking water poses a threat to the health of the population (causes methemoglobinemia in children). Ammonium compounds do not have a direct effect on the population health, but have possible effect on the drinking water organoleptic parameters (taste and smell), on the process of water disinfection and occurrence of nitrites in water distribution systems. Hence the study and the search for possible ways of using biotechnological methods of removing nitrogen compounds from drinking water in a similar way to those that occur during wastewater treatment is urgent.

Objective. The aim of the paper is to review modern technologies for removing nitrogen compounds from drinking water and to systematize biological agents that are used during the process to assess the prospects for using biotechnological methods for removing nitrogen compounds at domestic water supply and sanitation facilities.

Methods. A study of the current state of biological nitrification-denitrification in the purification of drinking water was carried out by reviewing the scientific literature on the application of modern biotechnological methods of nitrification-denitrification of drinking water.

Results. The analysis showed that for the heterotrophic process, the presence of a carbon source is necessary, for autotrophic – a study to find the optimal electron donor.

Conclusions. For the wide use of biofilters to remove nitrogen compounds from drinking water, it is necessary to seek ways to improve their work by replacing the biological agent, intensifying nitrification-denitrification processes, using mutant strains of microorganisms isolated from the loading of working filters.

Keywords: nitrogen-containing compounds; drinking water; nitrification; denitrification; biotechnology of removal of nitrogen-containing compounds.