

CZU: 628.3:579.68

DOI: 10.46727/c.v1.16-17-05-2024.p131-138

METODELE MICROBIOLOGICE DE EPURARE A APELOR UZATE DE COMPUȘII AZOTULUI

MICROBIOLOGICAL METHODS OF WASTEWATER PURIFICATION OF NITROGEN COMPOUNDS

Șepeli Diana, dr., USM, Institutul de Chimie
Spătaru Petru, dr., USM, Institutul de Chimie
Vișnevschi Alexandru, USM, Institutul de Chimie

Shepel Diana, PhD, Moldova State University, Institute of Chemistry,
ORCID: 0000-0002-0192-1085, dianashepel@gmail.com

Spataru Petru, PhD, Moldova State University, Institute of Chemistry,
ORCID: 0000-0003-0589-1386

Visnevschi Alexandru, Moldova State University, Institute of Chemistry,
ORCID: 0000-0003-2049-8312

Rezumat. *Au fost studiate datele din literatura de specialitate ale cercetătorilor străini în domeniul celor mai recente metode microbiologice pentru eliminarea compușilor azotului din apele uzate. Au fost analizați principalii parametri tehnologici ai funcționării instalațiilor de epurare. Au fost studiate tehnologiile (BioDenifho, Bardenpho) bazate pe metode tradiționale de epurare a apelor reziduale, cum ar fi nitrificarea și denitrificarea, precum și metodele pentru îndepărtarea compușilor de azot din apele uzate în instalațiile de epurare „constructed wetlands”. Sunt date exemple de tehnologii utilizate pentru epurarea anaerobă a apelor uzate pe baza procesului ANAMMOX (SHARON-ANAMMOX, CANON, OLAND, DEAMOX). Au fost analizate deficiențele tehnologiilor studiate, în funcție de parametrii tehnologici și de caracteristicile proceselor microbiologice și biochimice care au loc în timpul epurării apelor uzate.*

Cuvinte-cheie: *ape uzate, nitrificare, denitrificare, proces ANAMMOX.*

Abstract. *The literature data of foreign researchers in the field of the latest microbiological methods for removing nitrogen compounds from wastewater was studied. The main technological parameters of the operation of treatment facilities were analyzed. The technologies (BioDenifho, Bardenpho) based on traditional methods of wastewater treatment, such as nitrification and denitrification, as well as methods for removing nitrogen pollution from wastewater in “constructed wetlands” treatment facilities were considered. The examples of technologies used in the anaerobic wastewater treatment based on the ANAMMOX process (SHARON-ANAMMOX, CANON, OLAND, DEAMOX) were given. Their disadvantages were studied depending on the technological parameters and the features of the microbiological and biochemical processes occurring during wastewater treatment.*

Keywords: *wastewater, nitrification, denitrification, ANAMMOX process.*

Introducere

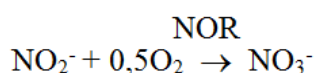
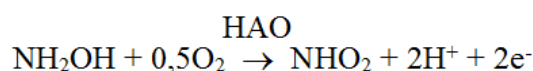
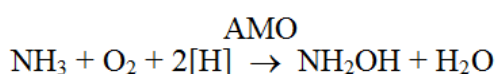
Eliminarea poluanților cu conținut de azot din apele uzate reprezintă o problemă actuală, deoarece amoniacul exercită un impact toxic nu doar asupra organismelor acvatice, ci și asupra echilibrului natural al ecosistemelor existente în ansamblu. Eliminarea eficientă a compușilor azotului din apele uzate este posibilă prin utilizarea metodelor microbiologice de epurare. Pe baza ciclului

biologic al azotului, au fost dezvoltate și implementate numeroase tehnologii și procese de epurare a apelor uzate de contaminările cu amoniac, bazate pe procesele microbiologice tradiționale de nitrificare și denitrificare, precum și pe procesul de oxidare anaerobă a amoniacului (procesul ANAMMOX). Astfel de tehnologii sunt utilizate în stațiile de epurare ale complexelor zootehnice.

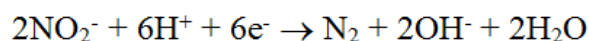
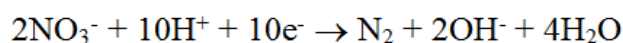
Scopul acestei lucrări constă în investigarea metodelor microbiologice de epurare a apelor uzate de compușii azotați și examinarea rolului proceselor ANAMMOX și denitrificării în tratarea apelor uzate. Metodele și materialele utilizate au inclus o revizuire sistematică și analitică a publicațiilor din reviste științifice și monografiile disponibile în bazele de date electronice naționale și internaționale, cum ar fi Scopus, Google Scholar și altele.

Rezultate și discuții

Metoda tradițională de eliminare microbiologică a compușilor azotului din apele uzate se bazează pe utilizarea consecutivă a proceselor de nitrificare și denitrificare. Nitrificarea amoniacului în natură se realizează în două etape, catalizate de două grupuri diferite de bacterii. În prima etapă, bacteriile amoniu-oxidante (BAO), cum ar fi cele din genul *Nitrosomonas*, transformă amoniacul în nitrit. Aici, amoniacul este oxidat până la hidroxilamină (NH_2OH), iar acceptorul de electroni este forma dimerică a dioxidului de azot (N_2O_4), procesul fiind catalizat de enzima amoniu-monooxidază (AMO) [1, 2]. Apoi, în prezența enzimei hidroxilamină oxidoreductază (HAO), hidroxilamina este oxidată [1, 2]. Ulterior, bacteriile nitrit-oxidante (BNO), cum ar fi cele din genul *Nitrobacter*, în prezența enzimei oxidoreductază (NOR), oxidează nitritul rezultat în nitrat:



Denitrificarea este realizată de heterotrofi, în acest proces NO_3^- și NO_2^- sunt convertiți în azot gazos, iar metanolul, acetatul și substanțele organice conținute în apele uzate acționează ca donatori de electroni:



În ansamblu, sunt examinate două mecanisme posibile de reacție, prezentate în Figura 1.

Unul dintre mecanisme presupune că un complex enzimatic legat de membrană transformă inițial amoniacul și hidroxilamina în hidrazină, după care hidrazina este oxidată în gaz diazotat în periplasmă. În același timp, nitritul este redus la hidroxilamină pe porțiunea citoplasmatică a aceluiași complex enzimatic, responsabil pentru oxidarea hidrazinei cu transfer intern de electroni (Fig. 1a). Un alt mecanism postulează următoarele: amoniacul și hidroxilamina sunt transformate în hidrazină printr-un complex enzimatic legat de membrană, hidrazina este oxidată în periplasmă la azot gazos, iar electronii generați sunt transferați printr-o lanț de transport de electroni către enzima de reducere a nitritului în citoplasmă, unde nitritul este redus la hidroxilamină (Fig. 1b).

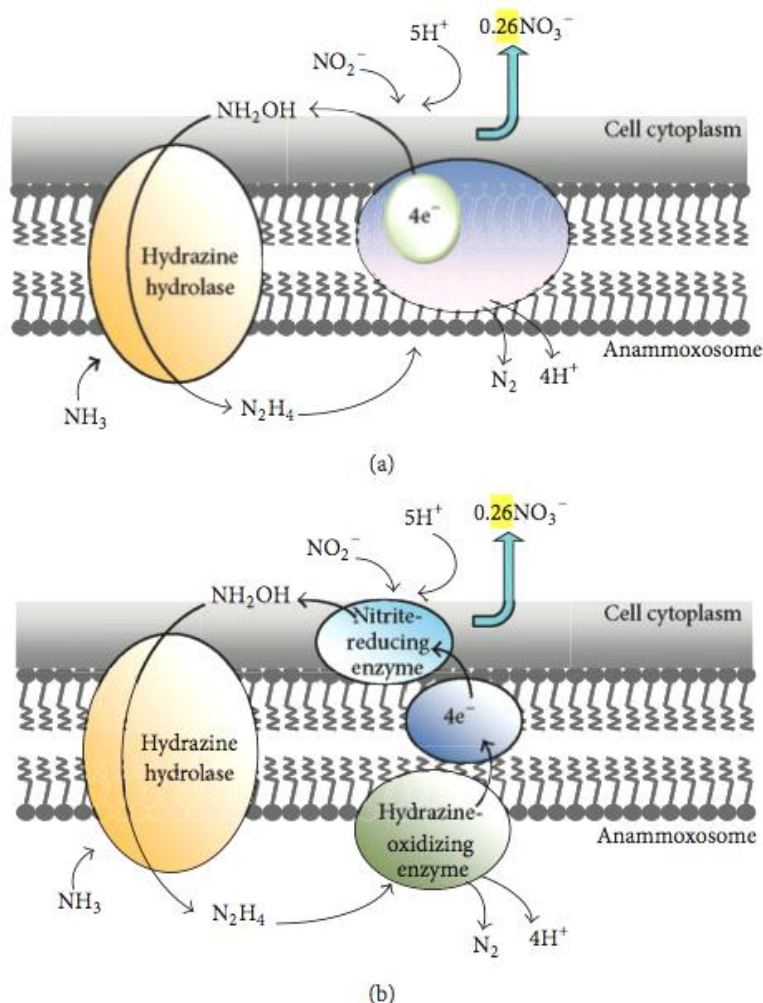


Fig. 1. Mecanismul biochimic posibil al ANAMMOX-ului și localizarea celulară a enzimelor care realizează acest proces [2]

În majoritatea instalațiilor cu nămolul activ, ambele procese sunt implementate în mod secvențial în reactoare separate, nitrificatoare și denitrificatoare, asigurând condiții aerobe și anaerobe corespunzătoare (anoxice, menținând concentrația de oxigen dizolvat în apă la nu mai mult de 0,5 mg/L) [3]. Astfel de sisteme secvențiale și etajate, cu oxidare separată a impurităților organice, nitrificare și denitrificare, asigură stabilitatea funcționării și o eficiență ridicată (până la 90%) în eliminarea compușilor de azot. Atunci când se utilizează un singur bioreactor, se realizează o alternanță secvențială între condiții aerobe și anoxice prin controlul alimentării cu aer. Tehnologiile BioDenipho prevăd eliminarea impurităților de azot utilizând două reactoare paralele cu aerare (pentru nitrificare). Ciclurile de aerare variază, asigurând flexibilitatea operațională pentru atingerea diferitelor obiective de tratare. Ulterior, apele uzate ajung în reactoare, unde are loc procesul de denitrificare.

Pentru implementarea tehnologiilor Bardenpho sunt utilizate sisteme cu cinci și patru etape. În sistemul cu cinci etape, se identifică cinci zone: anaerobă, anoxă (zonă în care lipsește oxigenul dizolvat, dar sunt prezenți oxizii), aerobă, anoxă și aerobă. Totodată, din cauza eficienței insuficiente a curățării, s-a propus să fie reconfigurat într-un sistem cu patru etape. În acest scop, primele două zone (anaerobă și anoxă) au fost unite, crescând astfel suprafața primei zone fără oxigen și facilitând

accesul acizilor grași volatili, contribuind la intensificarea denitrificării. În același scop, s-a propus și reducerea capacității pompelor care livrează apele uzate în prima zonă fără oxigen [4].

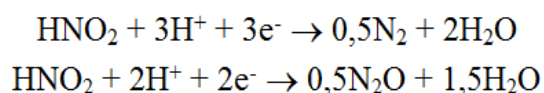
O altă tehnologie de tratare a apelor uzate de azot, denumită „Tidal-flow wetlands” (ecosisteme de mlaștini cu flux de maree pentru tratarea apelor uzate), presupune mineralizarea azotului organic prin inundarea și uscarea ciclică a reactorului [5], în timp ce nitrificarea și denitrificarea sunt reglate, în esență, prin adsorbție [6]. Ionii NH_4^+ sunt adsorbați pe biopelícula încărcată negativ. Oxigenul din aer pătrunde în pori, saturând biopelícula [7] și activând nitrificarea ulterioară a ionilor NH_4^+ adsorbați. Desorbția nitraților în volumul apei are loc în următorul ciclu de inundare ca rezultat al consumului în etapa de denitrificare [8].

Trebuie menționat că metodele tradiționale de microbiologie sunt asociate cu costuri mari pentru aerare (nitrificare) și furnizarea donatorului de electroni (denitrificare). Două reactoare separate, recircularea separată a nămolului și necesitatea introducerii unui substrat organic suplimentar cresc, de asemenea, semnificativ costul acestor sisteme de tratare.

Utilizarea unui singur bioreactor generează dificultăți în gestionarea procesului cu o biocenoză mixtă, iar pentru a atinge o eficiență optimă de curățare, de obicei, sunt necesare sisteme de control destul de complexe, incluzând feedback cu concentrația reală de amoniu și nitrați, precum și oxigen dizolvat în bioreactor.

Pentru realizarea unei oxigenări anaerobe intensive a amoniacului (procesul ANAMMOX), este necesară și nitrificarea prealabilă. Prima sa etapă începe, asemenea condițiilor aerobe, cu oxidarea amoniacului cu dioxid de azot la hidroxilamină și oxid de azot în prezența enzimei AMO (amoniu mono-oxidază).

La a doua etapă, hidroxilamina rezultată este oxidată până la acidul azotic în prezența enzimei HAO. Totodată, în condiții anaerobe, o parte din nitritul format acționează ca acceptor de electroni, ceea ce duce la formarea azotului molecular sau a oxidului de azot:



Prin urmare, principalul produs al oxidării anaerobe a amoniacului devine azotul molecular, precum și cantitățile de urmă ale diferitor oxizi (I, II, IV) [9]. Pe baza procesului ANAMMOX au fost elaborate tehnologii precum SHARON-ANAMMOX, CANON, OLAND, DEAMOX [10-19]. Sistemul tehnologic pentru eliminarea amoniacului din apele uzate SHARON-ANAMMOX (denumirea provine de la SHARON care prezintă un reactor unic de înaltă activitate pentru oxidarea amoniacului la nitrit, High activity Ammonia Removal Over Nitrite) și ANAerobic AMMmonium OXidation (ANAMMOX) care este un reactor de oxidare a amoniacului anaerob) include două etape. În prima etapă (reacția SHARON), aproximativ jumătate din amoniac este oxidat, în condiții aerobe cu implicarea microorganismelor corespunzătoare, la nitrit. În cea de-a doua etapă, amestecul format din nitrit și amoniac este introdus în reactorul anaerob ANAMMOX, unde are loc conversia sa în azot molecular și, parțial, nitrat. Această tehnologie permite reducerea costurilor de nitrificare aerobă și eliminarea etapei de denitrificare [10, 11].

Există o metodă care implică eliminarea simultană a poluării cu azot prin intermediul procesului ANAMMOX și denitrificării într-un singur reactor (SBR – Single Batch Reactor, reactor cu acțiune periodică). Aceasta prezintă asemănări cu tehnologia SHARON, cu excepția faptului că în tehnologia SHARON nu se urmărește obținerea procesului ANAMMOX ca atare, ci acesta este inclus în

tehnologia SHARON-ANAMMOX. În acest scenariu, eliminarea azotului este îmbunătățită prin reducerea proporției de nitrat și azot total (TN, inclusiv amoniac, nitriți și nitrați) în mediu. Acest efect este realizat prin diluarea reziduurilor la intrarea lor în reactor. Eficiența procesului de curățare, la un raport C:N de 2:1, atinge 97,47%. Creșterea consecutivă a cantității de substanțe organice în mediu a condus la o scădere a performanței din cauza inhibării bacteriilor ANAMMOX. Cu toate acestea, după încetarea adăugării de substanțe organice, numărul acestora se restabilește rapid [10, 12].

O limitare a tehnologiei SHARON-ANAMMOX constă în necesitatea gestionării mai multor regimuri de control (bazate pe concentrația de oxigen dizolvat, pH și potențial redox) [13], esențiale pentru menținerea unei funcționări stabile a procesului de nitrificare. În plus, implementarea acestei tehnologii impune menținerea temperaturii la aproximativ 35°C. Pentru a asigura o oxidare parțială a amoniacului în reactorul SHARON din cadrul tehnologiei SHARON-ANAMMOX, este necesar să se monitorizeze cu strictețe condițiile care favorizează doar bacteriile amoniacal-oxidante (*Nitrosomas* sp.), responsabile de conversia amoniacului în nitrit, și să se inhibe dezvoltarea microorganismelor oxidatoare de nitrit (NOB).

Tehnologia CANON (Completely Autotrophic Nitrogen removal Over Nitrite – eliminarea complet autotrofă a azotului până la nitriți) presupune combinarea proceselor de nitrificare parțială și oxidare anaerobă a amoniacului, efectuate de comunitatea de nitrificatori și bacterii ANAMMOX, într-un singur reactor (în contrast cu sistemul cu două reactoare SNARON-ANAMMOX). În condițiile unei oferte limitate de oxigen, bacteriile amoniacal-oxidante utilizează amoniacul pentru a-l oxida în nitrit, menținând simultan condiții anoxice esențiale pentru viața bacteriilor ANAMMOX. Nitritul rezultat, în prezența amoniacului din mediu, este redus la azot molecular de către bacteriile ANAMMOX [14].

Avantajul tehnologiei CANON constă în faptul că se utilizează un singur reactor, ceea ce reduce semnificativ costurile de construcție. Cu toate acestea, procesul necesită un control strict al conținutului de oxigen în mediu și a încărcăturii de compuși ai azotului. Deficitul de azot amoniacal în cazul unui exces de oxigen face ca bacteriile nitrit-oxidante să obțină avantajul asupra bacteriilor ANAMMOX, deoarece acestea au o rată de creștere mai mare și, implicit, o viteză mai mare de consum a substratului, conducând la o lipsă de azot amoniacal în mediu și, în consecință, la imposibilitatea realizării procesului ANAMMOX. De asemenea, compoziția populației microbiene este influențată de grosimea filmului biologic și dimensiunea agregatelor de nămol. De exemplu, agregatele cu dimensiuni >500 μm conțineau aproximativ 68% bacterii ANAMMOX, în timp ce cele <500 μm conțineau doar aproximativ 35% [15]. Acest lucru se explică prin faptul că oxigenul are dificultăți în a pătrunde în granulele mai mari, creând condiții favorabile pentru viața microorganismelor ANAMMOX. Factorii care influențează procesele SHARON-ANAMMOX trebuie, de asemenea, controlați în cazul procesului CANON.

O evoluție notabilă utilizează tehnologia CANON în sistemele de epurare bazate pe tehnologia „Tidal vertical flow” (sisteme de curgere verticală în flux descendent), cu scopul de a îmbunătăți eficiența eliminării compușilor azotului din apele uzate în ecosistemele umede construite (constructed wetlands). Pentru a asigura stabilitatea și o eficiență înaltă în epurarea contaminanților azotici, etapa de utilizare a „Tidal flow” în „constructed wetlands” a fost înlocuită cu o recirculare internă a fluxului ascendent, creând anterior o zonă superioară afluxurilor saturată cu oxigen. Reducerea ciclurilor de recirculare duce la scăderea conținutului de oxigen în reactor, promovând nitrificarea parțială și

procesul ANAMMOX, dar, în același timp, reducând viteza de conversie a azotului. În cazul creșterii numărului de cicluri de recirculare, procesul de oxidare a amoniacului este intensificat, însă acest lucru este însoțit de perturbarea nitrificării parțiale și de încetinirea procesului ANAMMOX. O concentrație crescută de carbon neorganic poate stimula simultan activitatea bacteriilor oxidante de amoniu și a bacteriilor ANAMMOX, fără a afecta bacteriile nitrit-oxidante [16].

Deficiențele tehnologiei CANON cuprind dificultatea controlului furnizării de oxigen în reactor și administrarea unei biocenoze microbiene mixte. În plus, eliminarea contaminanților azotici are loc într-un singur reactor, prin intermediul tehnologiei OLAND (Oxygen-Limited Autotrophic Nitrification-Denitrification, reactor autotrof limitat de oxigen pentru nitrificare-denitrificare) [17]. În cadrul acestui proces, în prima etapă, NH_4^+ este parțial oxidat la NO_2^- cu ajutorul bacteriilor oxidante de amoniu (AOB), având oxigenul drept acceptor de electroni; ulterior, prin amestecarea NO_2^- cu o altă porțiune de NH_4^+ , se formează N_2 [18]. Deficiențele acestei tehnologii includ eficiența redusă a eliminării sub formă de azot molecular (sub 40%); procesul necesită controlul pH-ului și temperaturii, iar concentrația de oxigen are o importanță crucială (populația AOB scade în condiții de deficit de oxigen).

În cadrul cunoscutei tehnologii DEAMOX (DENitrifying AMmonia OXidation – proces biologic de eliminare a poluării azotice, bazat pe oxidarea anaerobă a amoniacului în asociere cu conversia dependentă de sulfid a nitratului în nitrit), se realizează divizarea deșeurilor de bază în două fluxuri. Primul dintre ele este supus nitrificării tradiționale. În acest proces, nu este necesar un control special, deoarece nu există scopul de a obține doar nitrit. Apoi, dejecțiile parțial nitrificate sunt amestecate în reactorul DEAMOX cu al doilea flux, în care, de obicei, există o anumită cantitate de donor de electroni (sulfid sau impurități organice). În condiții autotrofe sau heterotrofe, datorită denitrificării parțiale a nitratului, se formează nitrit, care este imediat absorbit împreună cu amoniacul prezent de către bacteriile ANAMMOX, generând azot molecular [19]. Dezavantajul tehnologiei DEAMOX constă în necesitatea creșterii temperaturii de la 20°C în nitrificator la $35\pm 1^\circ\text{C}$ în reactorul DEAMOX și menținerea ulterioară a acesteia la acest nivel. În același timp, tehnologia este larg utilizată în cazul concentrațiilor ridicate de poluare (între 300-1000 mg N/L/zi).

În lumina existenței procesului ANAMMOX în ecosistemele naturale, este rezonabil să presupunem că acesta ar putea fi implementat în sistemele de tratare a apelor reziduale nu doar ca o etapă intensivă, ci și ca una extensivă.

Concluzii

Analizând lucrările dedicate metodelor moderne de tratare intensivă a apelor reziduale pentru îndepărtarea compușilor de azot, am identificat neajunsurile tehnologiilor actuale. În cazul metodelor tradiționale, cum ar fi BioDenipho și Bardenpho, acestea includ un consum ridicat de energie și necesitatea adăugării de substanțe organice pentru a realiza procesul de denitrificare. Deficiențele metodelor intensive de tratare, precum SHARON-ANAMMOX, includ necesitatea implementării mai multor moduri de control și menținerea temperaturii de intrare a deșeurilor în intervalul $34-36^\circ\text{C}$. În cazul metodei CANON, aspectele critice includ necesitatea controlului conținutului de oxigen pentru a asigura funcționarea eficientă a biocenozei mixte și încărcarea cu azot. Pentru metoda OLAND, se remarcă eficiența redusă în eliminarea azotului și necesitatea unui control riguros al pH-ului, temperaturii și concentrației de oxigen. În ceea ce privește metoda DEAMOX, este necesară menținerea unei temperaturi optime în reactorul DEAMOX.

Această lucrare a fost susținută de programul de stat nr. 20.80009.7007.20 în cadrul Agenției Naționale pentru Cercetare și Dezvoltare a Moldovei.

Bibliografie:

1. ZHU, G.; PENG, Y.; LI, B.; GUO, J.; YANG, Q.; WANG, S. Biological Removal of Nitrogen from Wastewater. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2008, 192, p.159–195. ISSN 2197-6554. doi: 10.1007/978-0-387-71724-1_5 (IF: 7.563).
2. NI, S.-Q.; ZHANG, J. Anaerobic Ammonium Oxidation: From Laboratory to Full-Scale Application. *BioMed Research International*. 2013, 2013 (1), p. 1-10, 2013. ISSN 2314-6133. doi: org/10.1155/2013/469360 (IF: 3.246).
3. KOLESNIKOV, V.P.; WILSON, E.V. *Dezvoltarea modernă a proceselor tehnologice de epurare a apelor reziduale în instalații combinate*. Sub redacția V.K. GORDEEVA-GAVRIKOVA. Rostov-pe-Don: Editura Yug, 2005. 212 p. ISBN 5-88094-069-1. Disponibil: <http://rniia.kh.com/docs/book.pdf> (vizitat 25.01.2024).
4. ZHAO, H. W.; FREED, A. J.; DIMASSIMO, R. W.; HONG, S.-N.; BUNDGAAD, E.; THOMSEN, H. A. Demonstration of phase length control of BioDeniflo process using on-line ammonia and nitrate analyzers at three full-scale wastewater treatment plants. *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2004, 2004 (15), p. 215-225. ISSN 1938-6478. doi: 10.2175/193864704784148277
5. DENIZ, T.; FRIEDRICH, T.W.; MILLIGAN J. An Advanced Pollution Control Facility's Conversion to Four-Stage Bardenpho to Improve Biological Nitrogen Removal. *Florida water resources journal*. 2009, 60 (1), p. 20-27. ISSN 0896-1794. Disponibil: https://fwrj.com/techarticles/0109%20FWRJ_tech1.pdf (vizitat 25.01.2024).
6. SUN, G.; GRAY, K.R.; BIDDLESTONE, A.J.; COOPER D.J. Treatment of Agricultural Wastewater in a Combined Tidal Flow-Downflow Reed Bed System. *Water Science and Technology*. 1999, 40 (3), p. 139-146. ISSN 0273-1223. doi: 10.2166/wst.1999.0154 (IF: 2.7).
7. MCBRIDE, G.B.; TANNER, C.C. Modeling biofilm nitrogen transformation in constructed wetland mesocosms with fluctuating water levels. *Ecological Engineering*. 1999, 14 (1-2), p. 93-106. Vol. 14 P. 93–106. ISSN 0925-8574. doi: 10.1016/s0925-8574(99)00022-1 (IF: 3.8).
8. AUSTIN, D.; LOHAN, E.; VERNON, E. Nitrification and denitrification in a Tidal vertical Flow wetland pilot. *Proceedings of the Water Environment Federation*. Los Angeles, California, 2003, 2003 (9), p. 333-357. ISSN 1938-6478. doi: 10.2175/193864703784639660
9. SCHMIDT, I.; BOCK, E. Anaerobic ammonia oxidation by cell-free extracts of *Nitrosomonas eutropha*. *Antonie van Leeuwenhoek*. 1998, 73 (3), pp. 271–278. ISSN 1572-9699. doi: 10.1023/a:1001572121053 (IF: 2.6).
10. CAO, S.; DU, R.; ZHOU, Y. Coupling anammox with heterotrophic denitrification for enhanced nitrogen removal: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2020, 51 (8), p. 1-34. ISSN 1064-3389. doi: 10.1080/10643389.2020.1778394 (IF: 13.123).
11. KAMPSCHREUR, M. J.; POLDERMANS, R.; KLEEREBEZEM, R.; VAN DER STAR, W. R. L.; HAARHUIS, R.; JETTEN, M. S. M.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Emission of nitrous oxide and nitric oxide from a full-scale single-stage nitrification-anammox reactor. *Water Science and Technology*. 2009, 60 (12), p. 3211-3217. ISSN 0273-1223. doi:10.2166/wst.2009.608 (IF: 2.7).
12. DU, R.; PENG, Y.; CAO, S.; WU, C.; WENG, D.; WANG, S.; HE, J. Advanced nitrogen removal with simultaneous Anammox and denitrification in sequencing batch reactor. *Bioresource Technology*, 2014, 162, p. 316-322. ISSN 0960-8524. doi: 10.1016/j.biortech.2014.03.041 (IF: 11.4).
13. FUX, C.; BOEHLER, M.; HUBER, P.; BRUNNER, I.; SIEGRIST, H. Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant. *Journal of Biotechnology*. 2002, 99 (3), p. 295-306. ISSN 0168-1656. doi: 10.1016/s0168-1656(02)00220-1 (IF: 4.1).

14. THIRD, K. A.; SLIEKERS, A. O.; KUENEN, J. G.; JETTEN, M. S. M. The CANON System (Completely Autotrophic Nitrogen-removal Over Nitrite) under Ammonium Limitation: Interaction and Competition between Three Groups of Bacteria. *Systematic and Applied Microbiology*. 2001, 24 (4), p. 588-596. ISSN 0723-2020. doi: 10.1078/0723-2020-00077 (IF: 3.4).
15. THIRD, K. A.; PAXMAN, J.; SCHMID, M.; STROUS, M.; JETTEN, M. S. M.; CORD-RUWISCH, R.K.A. Enrichment of anammox from activated sludge and its application in the CANON process. *Microbial Ecology*. 2005, 49 (2), p. 236-244. ISSN 0095-3628. doi: 10.1007/s00248-004-0186-4 (IF: 3.6).
16. NIELSEN, M.; BOLLMANN, A.; SLIEKERS, O.; JETTEN, M.; SCHMID, M.; STROUS, M.; SCHMIDT, I.; LARSEN, L.H.; NIELSEN, L.P.; REVSBECH, N.P. Kinetics, diffusional limitation and microscale distribution of chemistry and organisms in a CANON reactor. *FEMS Microbiology Ecology*. 2005, 51 (2), p. 247-256. ISSN 0168-6496. doi: 10.1016/j.femsec.2004.09.003 (IF: 4.519).
17. HU, Y.; ZHAO, X.; ZHAO, Y. Achieving high-rate autotrophic nitrogen removal via Canon process in a modified single bed tidal flow constructed wetland. *Chemical Engineering Journal*. 2014, 237, p. 329-335. ISSN 1385-8947. doi: 10.1016/j.cej.2013.10.033 (IF: 15.1).
18. MULLER, E. B.; STOUTHAMER, A. H.; VAN VERSEVELD, H. W. Simultaneous NH₃ oxidation and N₂ production at reduced O₂ tensions by sewage sludge subcultured with chemolithotrophic medium. *Biodegradation*. 1995, 6 (4), p. 339–349. ISSN 0923-9820. doi: 10.1007/bf00695264 (IF: 3.731).
19. KALYUZHNYI, S.; GLADCHENKO, M. DEAMOX – New microbiological process of nitrogen removal from strong nitrogenous wastewater. *Desalination*. 2009, 248 (1-3), p. 783–793. ISSN 0011-9164. doi: 10.1016/j.desal.2009.02.054 (IF: 9.9).