

За даними Державної служби геології та надр України прогнози запаси питних та технічних вод в Київській області (разом із м. Київ) становлять 4215,3 тис. м³/добу, тобто видобули близько 5,1 % від прогнозних запасів.

Обсяг невикористаних прогнозних ресурсів підземних вод в Київській області сягає 4000,934 тис. м³/добу (94,9 %), що свідчить про великі потенційні можливості розширення їх використання практично по усій області, особливо для невеликих водоспоживачів з потребою в питній воді до 30-50 тис. м³/добу.

ФОСФАТАКУМУЛЮЮЧІ МІКРООРГАНІЗМИ В БІОЛОГІЧНОМУ ОЧИЩЕННІ ВОДИ ВІД БІОГЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Симоненко Т.П., Саблій Л.А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги 37, Київ, 03056, tanya.simonenko007@gmail.com

Ріст чисельності населення і відповідно його потреб вимагає інтенсифікації сільського господарства, зокрема використання добрив, які постачають рослинам дефіцитні біогенні елементи, такі як азот і фосфор, необхідні для їхнього посиленого росту і розвитку. Мінеральні добрива, які використовують найчастіше, мають ряд недоліків, серед яких властивість до швидкого вимивання з ґрунтів з опадами. Останнє разом зі скидом неочищених стічних вод (СВ) призводить до цвітіння водойм – особливо відчутної сьогодні екологічної проблеми. Для попередження антропогенної евтрофікації, яка є причиною біодеградації водних екосистем, ведуться розробки та впровадження технологій ефективного біологічного очищення СВ від сполук азоту і фосфору. Особлива увага приділяється видаленню вільних або органічно зв'язаних фосфатів.

Фосфор в природі є найменш доступним для мікроорганізмів елементом, оскільки знаходиться у формі складних слабо розчинних солей, а після їхнього біологічного вилугування або вимивання водою швидко залучається до клітинних структур. Поклади апатитів – сировини для виробництва мінеральних фосфорних добрив, незначні, зосереджені у невеликій кількості країн (75% у Марокко, більшість решти у Китаї та США) і близькі до вичерпання, при тому що є невідновлюваними. Тому запропоноване використання для очищення СВ мікроорганізмів, які здатні акумулювати значні кількості фосфатів, і біомаса яких може бути використана у якості біодобрив, є не лише екологічно, а й економічно необхідним [1].

Фосфати входять до складу життєвоважливих органічних речовин клітини (фосфоліпіди, нуклеотиди тощо), а також можуть накопичуватися у формі запасних неорганічних (важкорозчинні солі магнію у деяких архей, поліфосфати) та органічних (фосфоманнан – ектополісахарид дріжджів, тейхоеві кислоти грам-позитивних бактерій) сполук. Також показана можливість співсаджень фосфатів з кальцієм на слизові чохла ціанобактерій. Деякі бактерії, виділені у групу поліфосфатакумулюючих організмів (ПАО), мають особливий тип метаболізму і використовують накопичені у клітині великі кількості поліфосфатів для отримання енергії. Саме ці бактерії відповідають за видалення переважної кількості фосфатів із СВ, виділення та ідентифікація ПАО досі активно досліджуються [1].

Розуміння процесів метаболізму ПАО є значущим для підвищення ефективності очистки СВ від фосфатів та роботи самих очисних установок [1, 2].

Для посиленого біологічного видалення фосфору з СВ (enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process) використовують чергування багатих на джерело вуглецю анаеробних та збіднених на вуглець аеробних умов у просторово розділених установках. Запропонована модель метаболізму ПАО передбачає, що за відсутності кисню ці бактерії синтезують резервні сполуки вуглецю – полі- β -гідроксиалканоати (ПГА), як наслідок реакції на стрес і підготовки до тривалої відсутності кисню. Низькомолекулярні жирні кислоти (НЖК), такі як оцтова та пропіонова, необхідні для синтезу ПГА утворюються при анаеробному розкладі органічних речовин СВ в самій установці або у попередньому реакторі. Для синтезу ПГА НЖК перетворюються на КоА-похідні за допомогою енергії гідролізу АТФ, який регенерується при перенесенні кінцевого фосфатного залишку з поліфосфату на АДФ. Відбувається виділення вивільнених фосфат-іонів у середовище. Відновлений нікотинаміддинуклеотид ($\text{НАД}\cdot\text{H}+\text{H}^+$) на синтез ПГА постачається в результаті гідролізу резервного глікогену, а також частково в результаті гліколізу та окиснення НЖК у повному або розірваному циклі трикарбонових кислот. При потраплянні ПАО в аеробні умови синтезовані ПГА підлягають процесу окиснення, а вивільнена енергія використовується для поновлення запасів поліфосфатів, глікогену та для росту і розмноження клітин. При цьому кількість поліфосфатів, що утворюється, набагато більша за кількість гідролізованих у анаеробних умовах, що забезпечує видалення з води більшої частини фосфатів [1-3].

В ході досліджень та спроб виділити ПАО з мулу очисних реакторів був ідентифікований *Candidatus Accumulibacter*, підклас, який відрізняється різноманітністю і споріднений до роду грам-негативних бактерій *Rhodocyclus*. Є найбільш поширеним у мулі EBPR установок та найбільш дослідженим типом ПАО. Метаболізм *Candidatus Accumulibacter phosphatis* повністю відповідає описаній вище моделі, яка вважається визначною для того, щоб відносити виділений вид бактерій до ПАО. Проте були описані досить поширені види (*Tetrasphaera* spp., *Microlunatus* spp.), які мають відмінний метаболізм: ферментують вуглеводи та амінокислоти без синтезу ПГА, поліфосфати постачають енергію в анаеробних умовах [1-3]. До найбільш поширених у активному мулі і важливих ПАО також відносять *Dechloromonas* spp., *Pseudomonas* spp., *Tessaracoccus* spp. [3].

Для деяких ПАО показана здатність крім кисню використовувати окиснені форми азоту (нітрат та/або нітрит) як кінцевий акцептор електронів при окисненні ПГА (денітрифікуючі ПАО, ДПАО). Така можливість поєднання процесів вилучення фосфатів та денітрифікації дозволяє проводити очищення СВ від основних лімітуючих евтрофікацію біогенних елементів і при цьому знизити витрати електроенергії на аерацію реакторів. Проте скидання електронів на нітрат є енергетично менш ефективним, ніж за використання кисню, що є причиною низької продуктивності ДПАО. Крім того до ДПАО належить лише невелика частина ПАО, присутніх у мулі, що також пояснює нижчий рівень видалення фосфатів за аноксидних умов. [2, 4] Проте, якщо після аноксидних умов були створені аеробні, то рівень видалення фосфатів залишається таким же, як при використанні лише аеробних умов, при нижчій (70% від необхідної) кількості кисню [5].

Окрім типу акцептора електронів, на ефективність роботи ПАО впливають різні фактори, такі як температурний режим, рН, тривалість анаеробної та аеробної або аноксидної стадій, концентрація йонів (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , а також K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} та інших іонів металів) у середовищі та конкуренція з глікогенакумулюючими бактеріями (ГАО). Останні мають схожий метаболізм, але енергію на синтез ПГА отримують тільки за рахунок гідролізу глікогену і взагалі не накопичують поліфосфатів. При цьому ГАО забирають із середовища НЖК, необхідні і для ПАО, що призводить до зниження їх активності і видалення фосфатів з води. На конкуренцію ПАО та ГАО сильно впливає температура: у ряді лабораторних дослідів та проб з очисних споруд було показано, що при зниженні температури зростає домінантність ПАО та підвищується ефективність вилучення фосфатів. Підвищене рН (7,5-8) сприяє

зміщенню до переважаючої кількості ПАО ніж ГАО. Також на конкуренцію між даними типами бактерій впливає той факт, що ПАО для синтезу ПГА можуть використовувати одночасно і оцтову, і пропіонову кислоти, на відміну від ГАО, які зазвичай прив'язані лише до одного типу кислоти, головним чином оцтової [2,3]. Як наслідок чергування зміни концентрації оцтової та пропіонової кислот в середовищі може сприяти розвитку ПАО, що доказано в ході лабораторних досліджень [2]. При співвідношенні 75% оцтової кислоти до 25% пропіонової спостерігали домінування ПАО. Для здійснення даної стратегії в умовах очисних споруд можливим є зміна типу НЖК, що подається в установку, за рахунок створення певних умов у реакторі, де відбувається попередній анаеробний розклад органічних речовин СВ. Так, додавання меляси до ферментера сприяє підвищенню концентрації пропіонату [2, 6]. Слід зазначити, що за певних умов, наприклад, нестачі фосфатів у середовищі, *Ca. Accumulibacter* ПАО можуть змінювати метаболічні шляхи на подібні до таких у ГАО. Повідомлення про наявність *Ca. Accumulibacter*, які не накопичують поліфосфатів, у мулі EBPR установок не рідкі [3].

Таким чином, біологічне очищення СВ від фосфору за допомогою ПАО є вигідним з екологічної та економічної точки зору, оскільки дозволяє вирішити проблему евтрофікації водойм, а відпрацьований мул після обробки може використовуватися як ефективне, доступне та екологічно чисте біодобриво. Інтенсифікація роботи очисних установок є досить складним процесом, оскільки для її здійснення необхідно враховувати вище зазначені фактори, що впливають на ПАО, їх розвиток у біоценозі активного мулу та його інші мікроорганізми. Тривають дослідження ролі ПАО у денітрифікації та розробка технологій, які б ефективно поєднали процеси біологічного вилучення з СВ сполук азоту і фосфору.

1. *Characterisation of Phosphate Accumulating Organisms and Techniques for Polyphosphate Detection: A Review* [Електронний ресурс] / [C. Tarayre, H. Nguyen, A. Brognaux та ін.] // *Sensors*. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4934223/>.

2. Urdalen I. *Polyphosphate Accumulating Organisms – recent advances in the microbiology of enhanced biological phosphorus removal* [Електронний ресурс] / Ivar Urdalen. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://pdfs.semanticscholar.org/b206/0a9a065eada596d5cdb6d8d54327f848a86d.pdf>.

3. *A Critical Assessment of the Microorganisms Proposed to be Important to Enhanced Biological Phosphorus Removal in Full-Scale Wastewater Treatment Systems* [Електронний ресурс] / [M. Stokholm-Bjerregaard, S. McIlroy, M. Nierychlo та ін.] // *Front Microbiol.* – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5406452/#>.

4. Hu ZR. *Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems* / ZR. Hu, M. Wentzel, G. Ekama. // *Water Research*. – 2002. – №36. – С. 4927–4937.

5. *Denitrification activity of polyphosphate accumulating organisms (PAOs) in full-scale wastewater treatment plants* [Електронний ресурс] / [A. Lanham, A. Oehmen, G. Carvalho та ін.] // *Water Sci Technol.* – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://iwaponline.com/wst/article-lookup/doi/10.2166/wst.2018.517>.

6. *The effect of substrate competition on the metabolism of polyphosphate accumulating organisms (PAOs)* / M. Carvalheira, A. Oehmen, G. Carvalho, M. Reisa. // *Water Research*. – 2014. – №64. – С. 149–159.