

П. ГВОЗДЯК

ЗА ПРИНЦИПОМ БІОКОНВЕЄРА

Біотехнологія охорони довкілля

XXI вік, на думку футурологів, стане століттям біотехнологій. І хоча прогнози, особливо у науці, не завжди збуваються, проте без біотехнологій суспільство просто не може існувати.

Біотехнологія охорони довкілля — відносно молода галузь, бо налічує трохи більше ста років. Але розвивається вона дуже інтенсивно, особливо в останні десятиліття, коли люди зрозуміли, що сталий розвиток цивілізації, збереження біологічного розмаїття на Землі, здоров'я, добробут та й саме існування людини значною мірою залежать від чистоти навколишнього середовища. Отже, впровадження нових ефективних технологій його очищення — актуальне завдання сьогодення.

Біотехнологія охорони довкілля включає в себе технології очищення всіх трьох головних його складових: води, ґрунту і повітря (див. таблицю). Причому вони використовуються як для запобігання забрудненню довкілля хімічними речовинами природного і штучного походження (ксенобіотиками), так і для подолання наслідків техногенних аварій з викидом цих сполук у навколишнє середовище. В Україні застосовується переважна більшість існуючих у світі екологічних біотехнологій. Разом з тим маємо й такі, які невідомі за рубежом.

Біотехнологія охорони довкілля від хімічного забруднення				
Об'єкт охорони	Характер забруднення	Джерело забруднення	Наявність біологічних методів обробки	
			за рубежом	в Україні
Вода	Технологічний	Промислові стічні води	+	+
		Побутові стічні води	+	+
		Води з-під звалищ побутових відходів	+	±
		Сільськогосподарське забруднення води	+	?
		Зливові води	+	+
		Води, забруднені радіонуклідами	+	±
	Аварійний (відкритих водойм)	Промислові стоки	?	—
		Побутові стоки	?	+
		Виливи нафтопродуктів	+	+

		Виливи пестицидів	–	+
		Потрапляння радіонуклідів	–	±
Ґрунт	Технологічний	Нафтошлами	(РФ+)	+
		Звалища побутових відходів	+	–
		Породи мінеральні (відвали)	+	–
		Токсичні відходи	+	–
	Аварійний	Вилив нафтопродуктів	+	+
		Розсипи пестицидів	?	+
Повітря	Технологічний	Пари органічних розчинників	+	+
		Пари нафтопродуктів	– (РФ+)	+
		Пари формальдегіду, метанолу	+	–

? — авторові невідомо; РФ+ — використовується у Російській Федерації; ± — здійснено в лабораторних умовах і на пілотних установках.

Усі біотехнології очищення ґрунту *in situ*, тобто в природних умовах, розшарування нафтошламів, вилуговування металів з бідних руд, обробки твердих відходів передбачають сильне їх зволоження. А в разі використання спеціальних біореакторів процеси обробки ґрунту взагалі відбуваються у водному середовищі. Очищення повітря біологічними методами теж здійснюється із застосуванням води — у біоскруберах, що являють собою різновид біофільтрів для очищення води, або шляхом абсорбції забруднень водою у звичайних скруберах з подальшим очищенням її активним мулом. Отже, біотехнології звільнення ґрунту і повітря від хімічного забруднення зводяться, кінець кінцем, до біологічного очищення води.

Тож немає нічого дивного в тому, що найбільшого поширення екологічні біотехнології набули саме в очищенні побутових і промислових стічних вод, у підготовці питної води і у відновленні якості води відкритих басейнів (озер, річок, бухт тощо). Такі біотехнології використовуються на всіх шести континентах, в усіх країнах, у безпрецедентних обсягах і з вражаючими результатами. Так, англійці підраховали, що у Великій Британії щодобово біологічними методами очищується більше води (у тоннах), ніж протягом року виробляється всіх разом біотехнологічних продуктів (пива, хліба, молочних продуктів, антибіотиків, джину тощо). Загальновідомі наслідки біологічного очищення води Великих озер у Північній Америці та річки Рейн у ФРН.

Наша країна ніколи не пасла задніх у справі індустріального очищення стічних вод. В Україні вперше у межах Російської імперії ще 1887 р. було введено в експлуатацію біологічні зрошувальні системи. Саме наші земляки започаткували використання спеціально селекціонованих мікроорганізмів — деструкторів органічних речовин, які забруднюють воду, в практиці очищення промислових стоків [1]. В останні десятиліття у нас багато зроблено для створення теорії та відпрацювання практики біологічного відновлення якості води, яка вже була використана у промисловості та побуті. Знайдено принципово нові підходи до розв'язання цих непростих і важливих екологічних проблем.

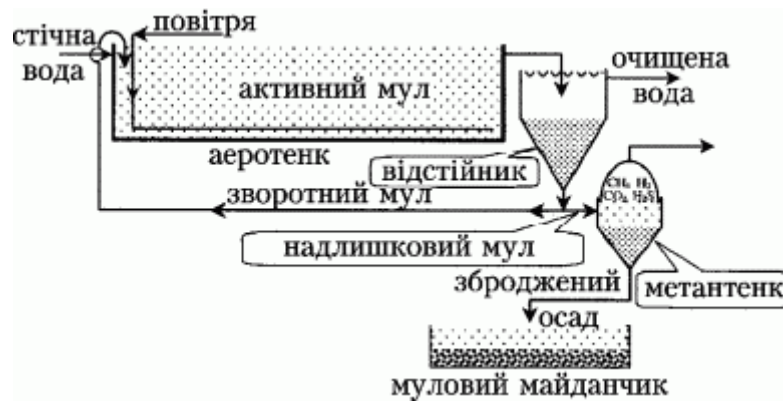


Рис. 1. Традиційне біологічне очищення води в аеротенку

Основним традиційним методом біологічного очищення стічних вод є обробка їх активним мулом в аеротенках. Типова технологічна схема такого очищення води наведена на рис. 1. Стічна вода після ретельного механічного очищення від різноманітного сміття, піску, жиру, інших дисперсних домішок, що осідають чи спливають у полі земного тяжіння, потрапляє у вузьку (3–11 м), глибоку (4–6 м) і довгу (50–250 м) споруду, де за постійної аерації очищається складним гідробіоценозом — активним мулом. Після тривалої (6–24 і навіть більше годин) обробки вода надходить у вторинний відстійник, в якому звільняється від активного мулу, а потім потрапляє для так званого третинного фізико-хімічного доочищення (іноді після хлорування) у проміжні водойми (ставки) і, нарешті, у річку. Частина активного мулу, що осідає у вторинному відстійнику, повертають до біологічної очисної споруди — аеротенку. Складну для розв'язання еколого-технологічну проблему створює за такої технології надлишковий мул: його дуже багато і він містить небезпечні віріони, мікроорганізми, яйця гельмінтів тощо, а також іони важких металів, біологічно стійкі, токсичні і навіть мутагенні сполуки.

Біотехнологія очищення стічних вод активним мулом була запропонована і реалізована в Англії у 1914 р. і відтоді принципово не змінилася, чого аж ніяк не можна сказати про склад стічних вод — навіть побутових, міських. Хімізація народного господарства й побуту, повсюдне інтенсивне використання синтетичних поверхнево-активних речовин як миючих засобів, розвиток текстильної промисловості, фармацевтичних і гальванічних виробництв тощо спричинили радикальне погіршення якості стічних вод. У них з'явилися стійкі до біорозкладу, невідомі біосфері ксенобіотики, іони важких металів, що згубно впливають на гідробіонти активного мулу, призводять до його «спухання», вимивання із вторинних відстійників. Як наслідок — погана «робота» мулу або навіть цілковита його нездатність очищати деякі (особливо промислові) стічні води. Зворотний активний мул навіть теоретично не може відновити якість інтенсивно забрудненої води, бо немає і не може бути такого гідробіоценозу, котрий би однаково добре почувався у дуже чистій (до якої прагнемо) і у стічній, доволі брудній (яку маємо) воді.

Постійне погіршення хімічного складу стоків і водночас закономірне підвищення вимог до якості очищеної води диктує необхідність створення нових методів біологічної обробки води.

Саме такий метод вдалося розробити в Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського завдяки принципово новому підходу до проблеми біологічного очищення води. Метод дістав назву «біоконвеєр». В його основі — задекларований нами «Закон погіршення довкілля» [2], а також постулати про просторову сукцесію мікроорганізмів (у процесі очищення води від розчинених органічних речовин) і про трофічний ланцюг гідробіонтів при її очищенні від завислих органічних речовин [3]. Вагомим обґрунтуванням знайдених підходів стали також теоретичні розробки академіка РАН Г.О.

Заварзіна [4]. Усе це дає змогу створити і реалізувати на практиці новітні біотехнології очищення промислових і побутових стічних вод, а також зливових і природних вод у біоконверсі (рис. 2).

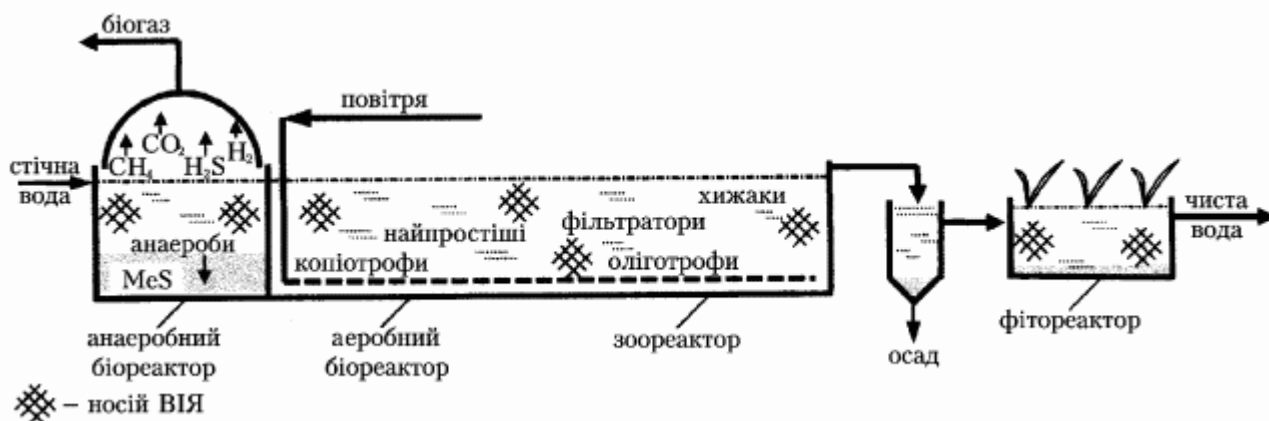


Рис. 2. Біоконверсер

Технологічна суть біоконверсера полягає в тому, що на шляху води, яку потрібно очистити, розміщені гідробіонти — анаеробні бактерії, аеробні мікроорганізми (копіотрофи, оліготрофи, найпростіші), фільтратори, хижаки. Перебуваючи на своїх «робочих місцях», вони «видають» з води розчинені у ній органічні сполуки і біомасу (тіла) організмів. У результаті маємо чисту воду і в сотні разів меншу надлишкову біомасу, утилізація якої, нагадаємо, в традиційному біологічному процесі очищення води становить дуже важку для розв'язання проблему.

Особливо цінно, що у біоконверсі, на відміну від біологічного очищення води зі зворотним активним мулом, немає насилля над гідробіонтами: тут ніхто не змушує їх жити там, де їм не подобається, і кожен гідробіонт у запропонованій системі біологічного очищення води вільний у своєму виборі місця проживання. Це дуже важливо, оскільки тільки вільний організм працює з максимальною продуктивністю.

Біоконверсер не має головних недоліків традиційного біологічного очищення води. По-перше, тут можна очищати будь-які (природні, злилові, побутові, промислові стічні) води, що містять розчинені органічні сполуки, навіть гранично токсичні, канцерогенні чи мутагенні, за будь-яких їх концентрацій. По-друге, біоконверсер дає змогу доводити якість очищеної води до будь-якого заданого ступеня чистоти. По-третє, він знімає проблему надлишкової біомаси, бо вона споживається і мінералізується у трофічному ланцюгу. Причому, що більша кількість трофічних рівнів задіяна у біоконверсі, то менше біомаси залишається в очищеній воді. Досить мати в очисній споруді трофічний ланцюг у 2–3 ланки, щоб зменшити кількість надлишкової біомаси у 100–1000 разів! Для цього під час біологічного очищення води потрібно використовувати не тільки прокаріотів, як це переважно відбувається при застосуванні активного мулу, а й весь існуючий у сучасній біосфері арсенал еукаріотів — фільтраторів і хижаків різних трофічних рівнів. Тобто тут «працює» не тільки горизонтальна, а й «вертикальна» складова еволюційного процесу (рис. 3).

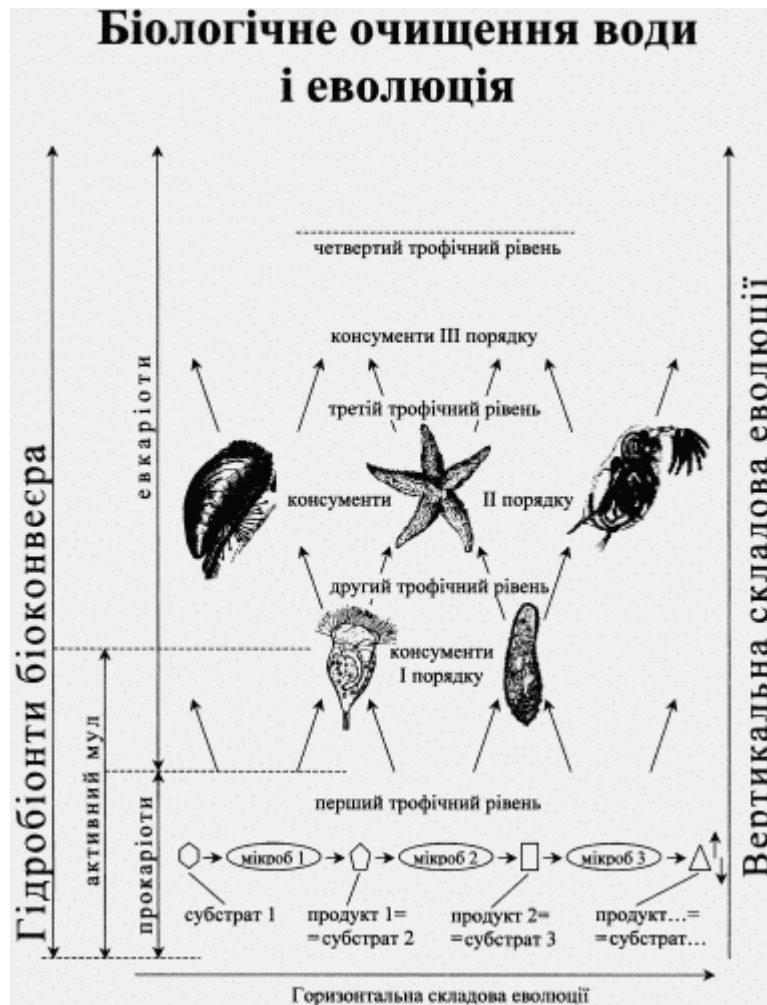


Рис. 3

Активний мул на 95 і більше відсотків складається з прокаріотів, здебільшого бактерій, і тільки менше 5% біомаси мулу становлять найпростіші [5]. Складніші за своєю структурною організацією гідробіонти в активному мулі трапляються дуже рідко, бо вони не мають шансів вижити у такій токсичній рідині, якою є сучасні (навіть побутові) стічні води. Адже останні містять ксенобіотики, а також токсичні продукти, що утворюються під час руху стоків довгими каналізаційними колекторами до очисних споруд.

Склад активного мулу можна порівняти з біотою, яка існувала на Землі в докембрійський період. Тодішній біоценоз був самодостатнім і міг у принципі забезпечити кругообіг елементів у природі [4]. У цьому біоценозі мали бути одночасно такі мікроорганізми, які створювали послідовний ряд (рис. на с. 2 обкладинки), де метаболіт 1 мікроорганізму 1 слугував би субстратом організму 2, а продукт метаболізму організму 2 споживався б мікроорганізмом 3 і так далі, доки всі метаболіти не розклалися б повністю до H_2O і летких речовин (CO_2 , H_2S , NH_3 , N_2 та ін.) або до нерозчинних у воді хімічних сполук (MeS , $CaSO_4$, $FePO_4$ тощо), які залишили б воду у вигляді газів чи осадів. Інакше розчинні метаболіти пригнічували б організми, котрі їх виділяють, і цикл кругообігу біогенних елементів у біосфері не був би замкненим.

Ми назвали цей ланцюг перетворень «горизонтальною складовою» еволюції. Попри її самодостатність вона мала дуже істотний недолік, що став величезним благом для сучасного суспільства: в результаті функціонування «горизонтальної складової» у біосфері накопичилася величезна біомаса мікроорганізмів, акумулюючи в собі колосальну

кількість вуглецю та інших біогенів і вилучаючи їх з кругообігу в природі. Виникла, здавалося б, безвихідна ситуація: біосфера загнала себе у глухий кут. Але життя знайшло елегантний вихід у вигляді біохімічного процесу, який одержав назву «автоліз» — ферментативне самознищення, розклад біологічних структур кожного організму.

Однак автоліз — дуже повільний процес, і за швидкістю його не можна порівняти з процесами біосинтезу, розмноження організмів, наростання їх біомаси. Тож перш ніж досягти автолізу, біомаса мікроорганізмів «горизонтальної складової» еволюції встигала осісти разом з осадовими породами на дно водойм, ущільнитись там і надійно відгородитися мінеральними осадовими породами від решти біосферного світу. Саме з цих «надлишкових біомас» і виникли поклади нафти, газу, залізних і марганцевих руд, фосфоритів та інших дуже корисних копалин.

Поява евкаріотів і утворення «вертикальної складової» еволюції різко прискорили кругообіг елементів у біосфері, і нині в природі фактично не спостерігається помітного накопичення біомаси будь-яких організмів, бо кожен з них стає поживою у трофічних ланцюгах і сітках фільтраторів, хижаків, паразитів, деструкторів.

Отже, для того, щоб за біологічного очищення води не створювалася надлишкова біомаса, потрібно залучати до цього процесу «вертикальну складову еволюції» — вищі форми гідробіонтів. Але тоді біотехнологія очищення води вийде за межі класичної біотехнології, яка, за визначенням Європейської біотехнологічної федерації, передбачає «одночасне використання біохімії, мікробіології та хімічної технології для технологічного (промислового) застосування корисних властивостей мікроорганізмів і культур тканин» [5]. Щоправда, наша біотехнологія і без того різко, так би мовити, ідеологічно відрізняється від решти біотехнологій, кожна з яких має на меті одержання певного біотехнологічного продукту: спирту, кислоти, антибіотика, інсуліну, ферменту, токсину або біомаси, наприклад, дріжджів (рис. 4). Для цього підбирають (селекціонують) чи створюють певний штам мікроорганізму, детально його вивчають, задовольняють усі його «гастрономічні забаганки» щодо вітамінів і мікроелементів включно, забезпечують чітко всі фізико-хімічні умови (аерацію, рН, температуру, масообмін), прискіпливо оберігають вміст біореактора від інвазії сторонніх мікроорганізмів.

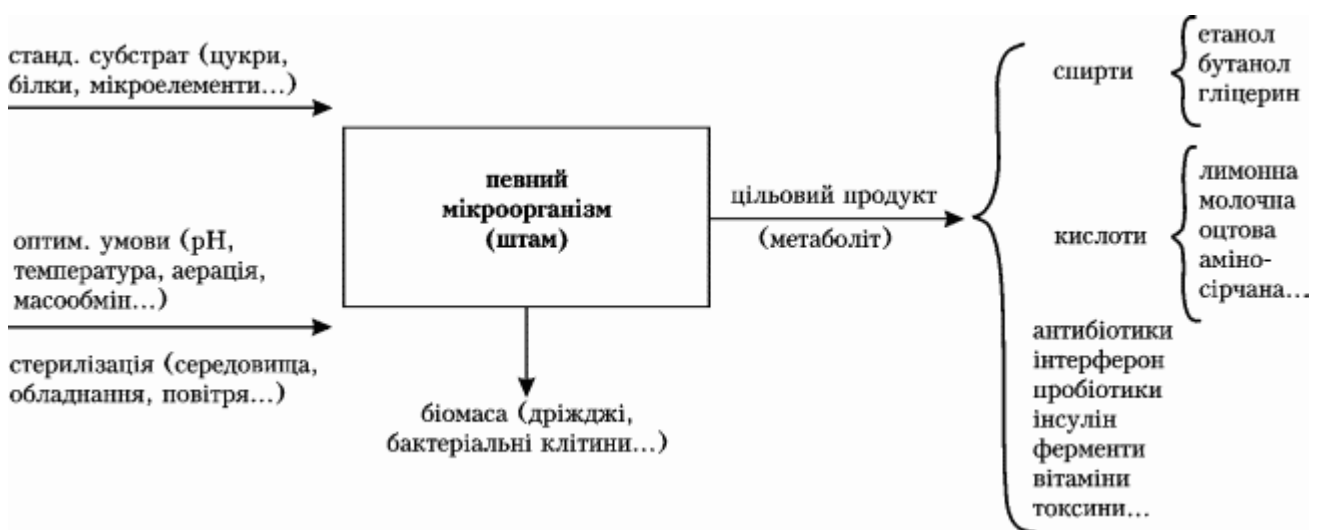


Рис. 4. Типова мікробна біотехнологія

У біотехнології очищення води ситуація абсолютно інша. Тут доводиться виходити з того, що існує стічна вода, в якій присутні різні, у тому числі (а то й переважно)

непередбачувані забруднення — природні і синтетичні органічні сполуки, іони важких металів, словом, не тільки вся таблиця Менделєєва, а й значна частина багатотомного довідника Бальштейна (рис. 5). Вода ця (особливо промислові стоки) то гаряча, то холодна, то кисла, то лужна, причому завжди щедро контамінована різноманітними біологічними об'єктами. І ось з цієї суміші, склад і кількість якої постійно змінюється, потрібно в результаті біологічного процесу одержати чисту воду. Воду і більше нічого — жодних органічних метаболітів, біомаси, іонів важких металів. А оскільки перетворити весь цей бруд, що міститься у стічних водах, на H_2O неможливо навіть теоретично, то біотехнологія очищення води передбачає трансформування інших елементів, крім водню і кисню, у нерозчинні у воді речовини, які переходять у повітря або випадають в осад.

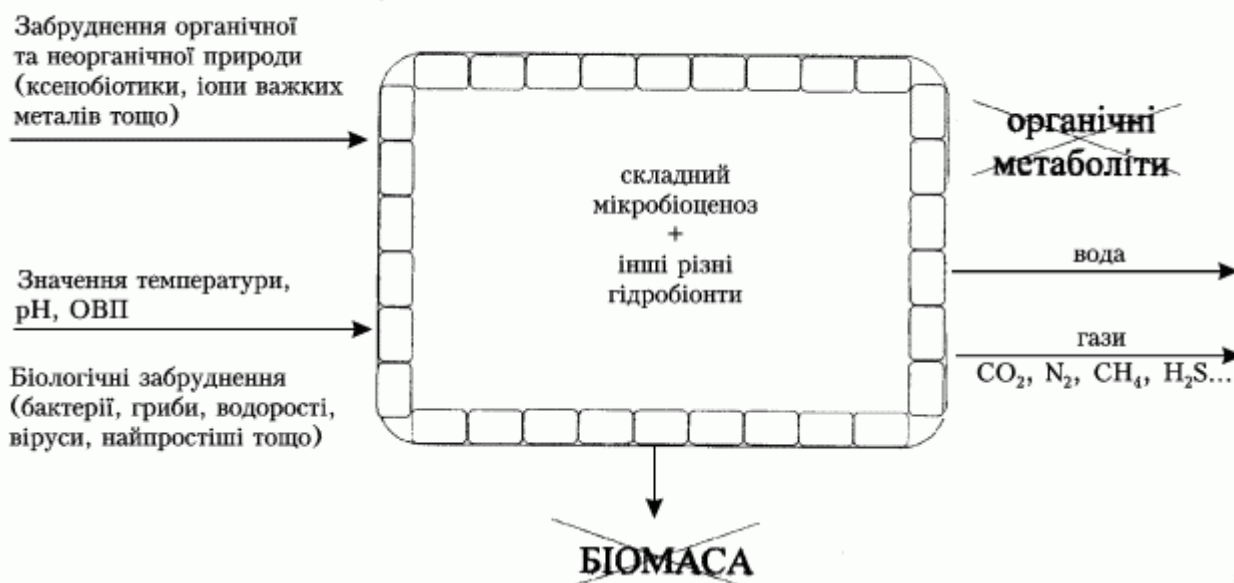


Рис. 5. Біотехнологія очищення води

Зрозуміло, що неможливо селекціонувати чи створити такий організм, такий штам, який би всі ці забруднення споживав без залишку та ще й свою власну біомасу перетравлював, виділяючи тільки воду і гази. Такого організму ніколи не було, немає і не буде. Одним мікробом, навіть найкращим, стічну воду добре очистити неможливо. У біосфері для постійного і якісного відновлення якості води існує надзвичайно велике розмаїття організмів — складні гідробіоценози. Отже, і для індустріального очищення стічних вод необхідно використовувати не тільки окремі штами мікроорганізмів — деструкторів тих чи інших органічних речовин, не тільки конгломерат прокариотів — активний мул, а й максимальну кількість (в ідеалі — всіх) існуючих у природі гідробіонтів. Саме це й передбачає запропонований нами біоконвеєр.

Біоконвеєр, як і всі інші відомі та широко застосовувані біотехнології охорони довкілля, — економічно вигідна і екологічно раціональна технологія. За принципом біоконвеєра вже працює більше сотні очисних споруд — нових і реконструйованих — з очищення промислових і побутових стоків, а також зливових і природних вод.

Так, наприклад, під час виробництва хімічного полімеру анід (найлон-66) на чернігівському ВО «Хімволокно» утворюється стічна вода, що містить 2500–4000 мг/л гексаметилендіаміну. Її називають «мертвою», оскільки очистити таку воду було неможливо жодним з відомих фізико-хімічних і традиційних біологічних методів. Її знешкоджували термічно — «спалювали» у спеціальних газових печах за температури

близько 950°C, витрачаючи по 350 м³ газу метану на 1 м³ води. Мікробіологи ІКХХВ НАН України знайшли мікроорганізми, які залюбки споживають гексаметилендіамін як джерело вуглецю, азоту й енергії [6]. Для біологічного очищення кубометра цієї «мертвої води» за розробленою біотехнологією потрібно витратити близько 0,1 кг ортофосфорної кислоти і 0,75 кВт х год електроенергії на аерацію та перекачування стоку. Обслуговування промислової установки здійснює один оператор, що працює по 6 годин на добу 5 днів на тиждень.

Не менш переконливий і другий приклад. Для очищення промислових стічних вод, які утворюються під час виробництва лаків і фарб на лідському ВО «Лакофарба» (Білорусь), наприкінці 80-х років минулого століття за проектом провідного галузевого московського інституту побудували 5 найкращих, як на той час, біологічних очисних споруд — окситенків (з аерацією технічним киснем замість повітря), передбачивши відповідні відстійники, накопичувачі тощо. Однак усі зусилля по запуску цих споруд в експлуатацію не увінчалися успіхом: активний мул не зміг жити у стічних водах з токсичними органічними забрудненнями (ксилолом, толуолом, фталевим і малеїновим ангідридами, циклогексанолом, акролеїном тощо) в концентрації 2000–10000 мг/л, а також іонами важких металів (свинцю, кобальту, цинку, кадмію, міді, нікелю) в концентрації 20–60 мг/л.

Ті ж самі очисні споруди, дооснащені волокнистими носіями типу «ВІЯ» і скомпоновані під розроблену відповідно до ідеї біоконвеєра прямоточну біотехнологію, перетворилися на дуже ефективні, прості в обслуговуванні, екологічно чисті, маловитратні споруди, які чудово працюють уже понад 12 років. При цьому повністю відпала необхідність в аерації трьох з п'яти побудованих окситенків, а два останні аеруються не киснем, а звичайним повітрям, що в кілька разів зменшує витрати електроенергії порівняно з очищенням стоків за традиційною біотехнологією [7].

В індустріально створеному на раніше побудованих очисних спорудах біоконвеєрі щодоби утилізується («з'їдається») у трофічному ланцюгу гідробіонтів понад 3000 кг біомаси, яка за реалізації біологічного очищення води в традиційних аеротенках наростала б у вигляді надлишкового мулу, захарашеного іонами важких металів і тому абсолютно непридатного для використання як добрива. Що ж до якості очищеної в біоконвеєрі води, то, як запевняють керівники ЗАТ «Лакофарба», тепер у промисловій стічній воді живуть риби.

А ось ще один приклад. Наприкінці 2001 р. на терміналі «Південний» нафтопроводу Одеса—Броди здано в експлуатацію станцію біологічного очищення побутових стічних вод, спроектовану і побудовану за принципом біоконвеєра. Станція включає відстійник, анаеробний і аеробний мікробні біореактори, зоо- та фітореактори. Саме у цих біологічних реакторах живуть і відновлюють якість води найрізноманітніші анаеробні та аеробні бактерії (копіо- і оліготрофи), мікроскопічні гриби, водорості, найпростіші, коловертки, дафнії, черви, ракоподібні, слимаки, ряска, гіацинти, аїр тощо. Незважаючи на несприятливу для пуску в дію очисних споруд і створення біоконвеєра пору року (зима), якість очищеної води дуже висока (хімічне споживання кисню — 15 мг/л, завислі речовини < 2 мг/л), експлуатаційні витрати вдвічі менші, ніж за традиційного біологічного очищення активним мулом, а надлишкового активного мулу практично немає.

Отже, конкретні дослідження, підкріплені практикою, дають нам підстави стверджувати: майбутнє біотехнології охорони довкілля, зокрема води, від хімічного та біологічного забруднення — у використанні якомога більшого розмаїття організмів у цих технологічних процесах.

1. Путилина Н.Т., Квитницкая Н.Н., Костовецкий Я.И. Микробный метод обесфеноливания сточных вод. — Киев: Здоров'я, 1969.—144 с.
 2. Гвоздяк П.И. Актуальні питання біологічного очищення води // Ойкумена. — 1992. — № 5–6. — С. 58—70.
 3. Гвоздяк П.И. 50 запитань і 49 відповідей з нової біотехнології очистки води. — Київ: Знання, 1990. — 28 с.
 4. Заварзин Г.А. Индивидуализм и системный анализ — два подхода к эволюции // Природа. — 1999. — № 1. — С. 23–34.
 5. Форстер К.Ф., Вейз Д.А. Дж. Экологическая биотехнология. — Ленинград: Химия, 1990. — 384 с.
 6. Ротмистров М.Н., Рой А.А., Гвоздяк П.И. Штамм *Bacillus subtilis* 21/3 для очистки сточных вод от гексаметилендиамина // АС СССР № 529210, С12 К 1/04. — 1976.
 7. Дмитренко Г.Н., Гвоздяк П.И. Биотехнология очистки высококонцентрированных сточных вод от органических растворителей // Химия и технология воды. — 2002. — 24. — № 2. — С. 185–190.
-

П. ГВОЗДЯК

ЗА ПРИНЦИПОМ БІОКОНВЕЄРА
(Біотехнологія охорони довкілля)

Резюме

Розглянуто відмінності між біологічним очищенням води та іншими мікробними біотехнологіями. Запропоновано та науково обґрунтовано застосування біологічного конвеєра в очищенні стічних, зливових і природних вод із залученням до цього процесу якомога ширшого кола гідробіонтів — від анаеробних бактерій до слимаків, риб та вищих водних рослин.

P. Gvozdyak

BASED ON THE PRINCIPLE OF BIOCONVEYER
(Biotechnology of environment safety)

Summary

Distinctions between biological purifying of water and other microbe biotechnologies are described. Bioconveyer application in purifying of sewage, rain and natural water is recommended by the author. He suggests to use wide range of water life — from anaerobic bacteria to slugs, fish and higher aquatic plants.

© ГВОЗДЯК Петро Ілліч. Доктор біологічних наук, професор. Головний науковий співробітник Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України (Київ). 2003.