

ОЦІНКА СТАДІЙ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ГІДРОБІОНТІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ТА СТІЧНИХ ВОД

Мальований М.С.¹, Афтаназів І.С.¹, Тимчук І.С.¹, Баландюх Ю.А.¹, Жук В.М., Копій М.Л.²

¹Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79013, м. Львів

²Національний лісотехнічний університет України
вул. Генерала Чупринки, 103, 79057, м. Львів

Проведений огляд відомих технологій очищення поверхневих та стічних вод із використанням різних типів гідробіонтів (аеробного та анаеробного мікробіоценозу, мікроводоростей, макроводоростей, водоплавних рослин, гідробіонтів із розвинутою кореневою системою). Запропонована концепція відкритого біологічного конвеєра для технології біологічного очищення забруднених водних середовищ. Відкритий біологічний конвеєр відрізняється від замкнутого біологічного конвеєра періодичним відбором та утилізацією нарощеної біомаси. На основі аналізу життєвого циклу гідробіонтів в біологічних технологіях очищення забруднених водних середовищ виділено п'ять стадій, описано особливості реалізації кожної із цих стадій. Проведений аналіз особливостей реалізації стадії збору та концентрування нарощеної біомаси для різних типів гідробіонтів. Експериментально підтверджена ефективність гравітаційного реагентного (коагуляційно-флокуляційного) загушення суспензій мікроводоростей виду *Microcystis aeruginosa*. Найбільшу ступінь загушення досягнуто у випадку спільного використання коагулянта PAX-18 або PAX-XL19H разом із флокулянтом марки A100. Проведений аналіз відомих методів попередньої обробки біомаси гідробіонтів: реагентної, тонкого подрібнення та помелу, ультразвукової кавітації, гідродинамічної кавітації, віброгідродинамічної кавітації. Порівняльним аналізом із використанням як критерію кількості екстрагованих в подальшій утилізації біомаси ліпідів встановлено, що найбільш перспективним видом попередньої обробки біомаси є віброкавітаційна обробка ціанобактерій перед реалізацією технологій їх утилізації. Технологічною перевагою такої обробки може бути можливість реалізації процесу обробки біомаси у безперервному режимі в потоці. *Ключові слова:* гідробіонти, кавітація, очищення, життєвий цикл, утилізація, ліпіди, біологічний конвеєр.

Hydrobionts life cycle stages assessment in surface and wastewater treatment technologies. Malovanyy V., Aftanaziv I., Tymchuk I., Balandiukh Ju., Zhuk V., Kopyi M.

A review of known technologies for surface and wastewater treatment using different types of hydrobionts (aerobic and anaerobic microbiocenosis, microalgae, macroalgae, floating aquatic plants, hydrobionts with a developed root system). The concept of an open biological conveyor for the technology of biological treatment of polluted aquatic environments is proposed. The open biological conveyor differs from the closed biological conveyor by periodic selection and utilization of the increased biomass. Based on the analysis of the hydrobionts life cycle of in biological technologies for the purification of polluted aquatic environments, five stages are identified, the features of the implementation of each of these stages are described. The analysis of application features of collecting and concentration stage of the increased biomass for various hydrobionts types is carried out. The effectiveness of gravitational reagent (coagulation-flocculation) thickening of the *Microcystis aeruginosa* species microalgae suspensions has been experimentally confirmed. The highest degree of thickening is achieved in the case of joint use of coagulant PAX-18 or PAX-XL19H with flocculant brand A100. The analysis of known methods of preliminary processing of hydrobionts biomass is carried out: reagent, fine grinding and grinding, ultrasonic cavitation, hydrodynamic cavitation, vibrohydrodynamic cavitation. Comparative analysis using as a criterion the amount of lipids extracted in the subsequent utilization of biomass found that the most promising type of pre-treatment of biomass is vibrocavitation treatment of cyanobacteria before the implementation of technologies for their utilization. The technological advantage of such treatment may be the ability to implement the processing biomass in a continuous mode in the stream. *Key words:* aquatic organisms, cavitation, purification, life cycle, utilization, lipids, biological conveyor.

Постановка проблеми. Використанню гідробіонтів для очищення стічних та поверхневих вод приділяється значна увага у дослідженнях цілого ряду дослідників. Зокрема поряд із величезною кількістю досліджень в галузі використання для очищення водних середовищ аеробного чи анаеробного мікробіоценозу (так званого активного мулу) значна увага приділяється також дослідженню перспектив застосування для цих цілей мікро- та макроводоростей, водоплавних рослин (із яких найбільше відомі водний гіацинт та ряска), гідробіонтів із розвинутою кореневою системою, які найчастіше використовуються у технологіях очищення в складі побудованих

штучних водно-болотних угідь. І у всіх випадках очищення супроводжується нарощенням додаткової біомаси як продукту використання рослинами забруднень, які для них є елементами живлення. Проте залишається дискусійним питання поводження із цією біомасою. Ряд дослідників пропонує утилізувати її в трофічному ланцюгу, який необхідно організувати в системі очищення, що складається з ділянок з різних типів гідробіонтів [1; 2]. Інші пропонують вилучати її із системи очищення і використовувати у різних сільськогосподарських технологіях, не приводячи конкретних вимог та стратегій такого використання [3; 4]. Тому пошуки оптимальних стратегій

та підходів шляхом оцінки стадій життєвого циклу гідробіонтів в технологіях очищення поверхневих вод і була предметом цього дослідження.

Актуальність дослідження. Технології біологічного очищення стічних та поверхневих вод, які широко досліджуються цілим рядом вчених, потребують детальних досліджень. Особливої актуальності ці дослідження набувають на сучасному етапі розвитку людства, який характеризується переоцінкою відносин до довкілля і поверненням в усіх галузях антропогенної діяльності та аспектах життєдіяльності до природних умов, природних продуктів, природних технологій. Як приклад можна навести стрімкий зріст популярності до органічних продуктів харчування, повернення (де це можливо) самоплинності річок, використання в адсорбційних технологіях природних дисперсних сорбентів і т.п. Тому останнім часом набувають широкої популярності і технології очищення забруднених водних середовищ із застосуванням гідробіонтів. За переконанням автора та популяризатора принципу біологічного конвеєра в Україні професора Петра Гвоздяка [1], майбутні біотехнології охорони довкілля, зокрема води, від хімічного та біологічного забруднення – у використанні якомога більшого розмаїття організмів у цих технологічних процесах. Різними групами дослідників встановлювались аспекти використання для очищення забруднених водних середовищ аеробного та анаеробного мікробіоценозу (ці технології найбільш широко досліджені в науковому плані, а в практичному отримали масове застосування), ряд досліджень присвячено використанню в технологіях біологічного очищення мікроводоростей та макроводоростей, водоплавних рослин, гідробіонтів із розвинутою кореневою системою. Тому оцінка оптимального комбінування стадій життєвого циклу для цих різних груп гідро біонтів є важливою та актуальною проблемою.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Тематика дослідження відповідає основним напрямкам наукової діяльності кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепція біологічного конвеєра розроблена в Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського за ініціативи і активної участі професора Петра Гвоздяка [1]. Технологічна суть біоконвеєра полягає в тому, що на шляху води, яку потрібно очистити, розміщені гідробіонти – анаеробні бактерії, аеробні мікроорганізми (копіотрофи, оліготрофи, найпростіші), фільтратори, хижакі. Перебуваючи на своїх «робочих місцях», вони «випускають» із води розчинені у ній органічні сполуки і біомасу (тіла) організмів. На думку авторів, перевагами біоконвеєра є можливість очищення будь-яких (природних, зливових, побутових, промислових стічних) вод, що містять розчи-

нені органічні сполуки, навіть гранично токсичні, канцерогенні чи мутагенні, за будь-яких їх концентрацій. Вважається, що біоконвеєр дає змогу довести якість очищеної води до будь-якого заданого ступеня чистоти. Він вирішує проблему надлишкової біомаси, оскільки вона споживається та мінералізується у трофічному ланцюгу. При цьому чим більша кількість трофічних рівнів задіяна у біоконвеєрі, тим менше біомаси залишається в очищеній воді. На думку автора, достатньо мати в очисній споруді трофічний ланцюг у 2-3 ланки, щоб зменшити кількість надлишкової біомаси у 100–1000 разів. Оскільки автор пропонує компонувати у біоконвеєрі трофічний ланцюг, то такий біоконвеєр повинен складати (або максимально наближатись) до замкнутої екобіологічної системи. Групи науковців, очолюваних П. Гвоздяком, розробили окремі варіанти біоконвеєрів для очищення токсичних стоків: токсичних відходів Чернігівського ВО «Хімволокно» (Україна), основним забруднювачем яких є гексаметилендіамін [1]; стічних вод АТ «Мотор Січ» (Україна), які забруднені нафтопродуктами та іонами нікелю [5]; стічних вод ВО «Лакофарба» (Білорусь), які забруднені токсичними органічними забрудненнями: ксилолом, толуолом, фталевим і малеїновим ангідридами, циклогексанолом, акролеїном тощо [1].

Слід зауважити, що окремі стадії біологічного конвеєра достатньою мірою досліджувались великою кількістю науковців, які в основному розглядали їх як окремі біологічні технології очищення: очищення стічних та поверхневих вод аеробним мікробіоценозом [6–8]; очищення цих об'єктів анаеробним методом [9–11]; дослідження систем очищення із застосуванням мікроводоростей [12–14]; перспектива використання водоплавних гідробіонтів в технологіях водоочищення [15–16]; детально досліджували очищення поверхневих та стічних вод в умовах побудованих штучних водно-болотних угідь (які часто називають «біоплато») [17–19].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття. Аналіз літературних джерел свідчить, що в життєвому циклі використання гідробіонтів в біологічних технологіях очищення водних середовищ основна увага приділялась самій технології очищення. Разом із тим інші стадії життєвого циклу (зокрема, такі важливі стадії, як відбір та утилізація нарощеної біомаси) не досліджувались. А як показує дослід масового забруднення довкілля продуктами розкладу біомаси ціанобактерій (які неконтрольовано розмножуються в літній період, очищаючи поверхневі водойми від забруднень, головним чином від сполук азоту та фосфору, що є їхніми елементами живлення) в акваторіях рік та водосховищ України, нехтувати цією стадією недопустимо. Тому аналіз життєвого циклу гідробіонтів в біологічних технологіях очищення поверхневих та стічних вод є важли-

вим аспектом, невирішеним раніше, і аналізу цього аспекту присвячується стаття.

Новизна роботи полягає у проведенні оцінки стадій життєвого циклу гідробіонтів у технологіях біологічного очищення за їх участю та встановленні оптимальних стратегій та оптимальних технологічних підходів у реалізації цих стадій.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Основною ідеєю відомої концепції біологічного конвеєра [1] є побудова в технології очищення поверхневих та стічних вод трофічного ланцюга. Унаслідок цього, за переконанням автора, вдається реалізувати основну перевагу пропонованого методу – добитись відсутності накопичення додаткової біомаси – нарощена біомаса мінералізується та споживається у трофічному ланцюгу. Позаяк ціллю автора цієї стратегії була організація для очищення стічних та поверхневих вод самодостатньої замкнутої системи із трофічним ланцюгом, який був створений штучно, в подальшому будемо використовувати назву такої технології «біологічний конвеєр замкнутого типу». Загальний вигляд біологічного конвеєра замкнутого типу представлений на рис. 1.

У загальному вигляді схема біоконвеєра замкнутого типу може бути представлена у вигляді (рис. 1):

На думку авторів цієї статті, не є цілком оправданим облаштування для біологічного конвеєра трофічного ланцюга. Основним завданням ділянки біологічного реактора є утилізація нарощеної біомаси, в очищенні стічної води ця ділянка практично не бере участі. Тому нами запропонована схема відкритого біологічного конвеєра, головною відмінністю якого від попередньої стратегії є відсутність трофічного ланцюга та значно розширена зона фітореактора за рахунок комбінування різних видів гідробіонтів. Нарощену біомасу пропону-

ється відбирати із схеми очищення і відводити на стадію утилізації.

Виклад основного матеріалу. На основі аналізу життєвого циклу гідробіонтів, що застосовуються в біологічних технологіях очищення стічних та поверхневих вод, нами виділено 5 стадій (рис. 2).

Динаміка очищення забруднених середовищ на першій стадії життєвого циклу гідробіонтів визначається типом гідробіонтів, схемою компонування ділянок із різними типами гідробіонтів в технології очищення, факторами впливу навколишнього середовища (температура, освітленість, гідродинамічний режим, умови клімату, рН водного середовища та його хімічний склад, концентрація забруднень, від яких проходить очищення і т.п.) та відповідністю їх оптимальним умовам розвитку гідробіонтів. Тому оптимальні умови реалізації цієї стадії, ступінь очищення водного середовища та кількість нарощеної біомаси повинні визначатись для кожної конкретної схеми біологічного конвеєра виходячи із цих умов.

Оптимальні умови реалізації другої стадії – збору та концентрування гідробіонтів – значною мірою визначається типом гідробіонтів, біомаса яких вилучається із системи очищення. Для збору біомаси водоплавних водних рослин та водних рослин із розвинутою кореневою системою доцільно використовувати наявне технологічне обладнання: спеціалізовані водні комбайни та плаваючі косарки. Для збору та концентрування мікродоростей доцільно використовувати двохстадійну технологію: первинний збір за допомогою переливних порогів та занурених викачувальних рукавів та концентрування у вертикальних концентраційних колонах [20]. Доцільним є забезпечити під час концентрування певний реагентний коагуляційно-флокуляційний режим, який дозволив би інтенсифікувати

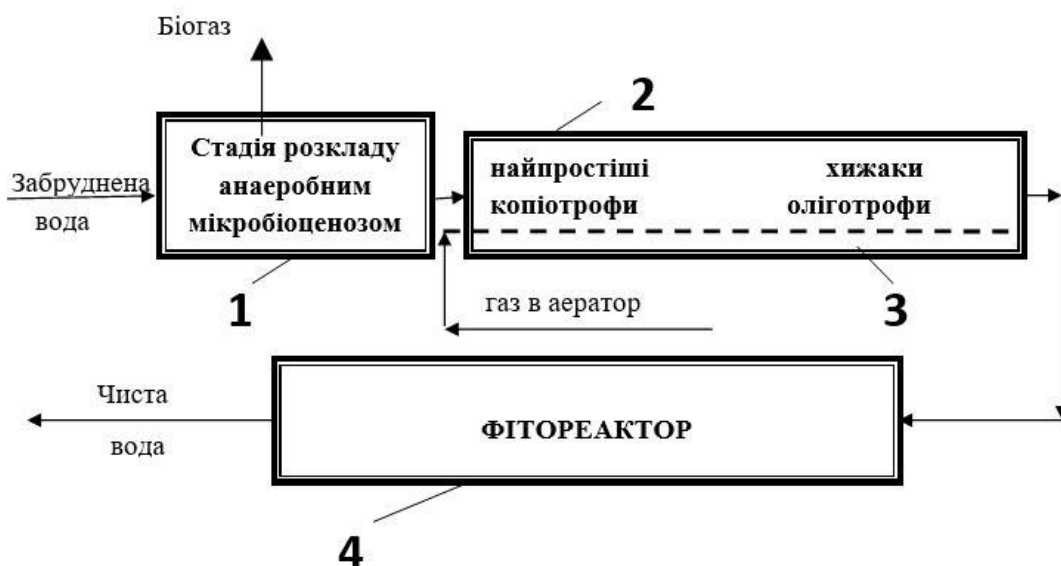


Рис. 1. Принципова схема біологічного конвеєра замкнутого типу: 1 – анаеробний біореактор, 2 – аеробний біореактор, 3 – зоореактор, 4 – фітореактор

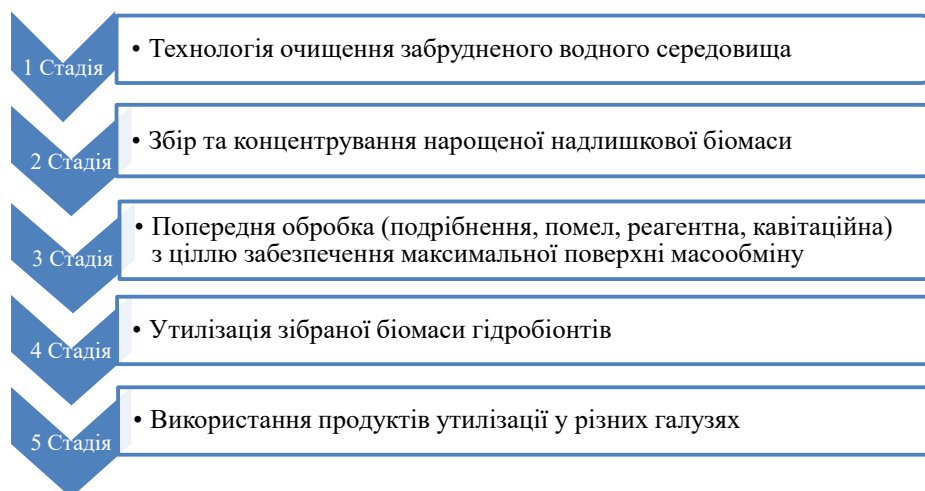


Рис. 2. Життєвий цикл гідробіонтів у технологіях очищення стічних та поверхневих вод

згущення. Нами підтверджена експериментально ефективність гравітаційного коагуляційно-флокуляційного згущення суспензій мікроводоростей виду *Microcystis aeruginosa* [21]. У реагентному режимі коагуляційно-флокуляційного згущення суспензії мікроводоростей використовувались водні розчини полімер-алюмінієвих коагулянтів типів PAX-18 та PAX-XL19H, та флокулянтів типу A100 фірми P.P.H.U. WĘGLO-STAL. Застосовувані реагентні режими приведені у таблиці 1, а результати досліджень наведені на рис. 3.

Таблиця 1

Реагентний склад коагуляційно-флокуляційного концентрування водної суспензії ціанобактерій

Номер реагентного складу	Концентрація реагентів, ррм		
	PAX-18	PAX-XL19H	A100
1	-	-	-
2	10	-	-
3	1	-	-
4	-	10	-
5	-	1	-
6	-	-	10
7	-	-	1
8	10	-	-
9	-	10	1

Згідно із приведеною на рис. 3 інформацією, найбільшу ступінь згущення досягнуто у випадку спільного використання коагулянта PAX-18 або PAX-XL19H разом із флокулянтом марки A100. За умов, коли початкова концентрація водорості *Microcystis aeruginosa* (за сухою речовиною) складає 500 ррм, а масова концентрація коагулянтів PAX-18 і PAX-XL19H 10 ррм, концентрація флокулянта A100 складає 1 ррм, за часу відстоювання 30 хв

після реагентної обробки ефект згущення суспензій складає відповідно в 11,8 та в 10,4 рази відносно об'єму. Масова концентрація біомаси водоростей *Microcystis aeruginosa* в об'ємі згущення після коагуляційно-флокуляційної обробки та розділення фаз збільшилася в порівнянні із початковою відповідно у 9,6 та у 9,0 рази, досягнувши значень 4800 ррм та 4500 ррм відповідно.

Як попередня обробка зібраної та зконцентрованої біомаси гідробіонтів залежно від типу гідробіонтів, технології та умов подальшої утилізації, може використовуватись реагентна обробка [22], тонке подрібнення та помел [22], ультразвукова кавітація [4], гідродинамічна кавітація [4], віброгідродинамічна кавітація [23]. Для кожного типу гідробіонтів доцільно застосовувати ті види попередньої обробки, які б давали найкращі результати у наступних процесах утилізації. Це вимагає окремих досліджень для кожного конкретного випадку. Нами проведена оцінка ефективності попередньої обробки біомаси на прикладі зміни кількості екстрагованих із біомаси ліпідів за методом [23] залежно від типу обробки. Результати приведені на рис. 4.

Приведені дані свідчать, що перспективною для практичного використання може бути обробка в полі гідродинамічної кавітації, але найбільш перспективною є віброкавітаційна обробка. Технологічно перевагою такої обробки може бути можливість реалізації процесу обробки біомаси у безперервному режимі в потоці.

Утилізація зібраної біомаси може реалізуватись шляхом отримання енергоносіїв (біогазу чи біодизелю), органічних чи органо-мінеральних добрив, протеїну, кормових добавок, фунгіцидів, інших необхідних для економіки продуктів. Біомаса гідробіонтів може застосовуватись як сировина у медицині, фармацевтиці, косметології, сільському господарстві, енергетиці.

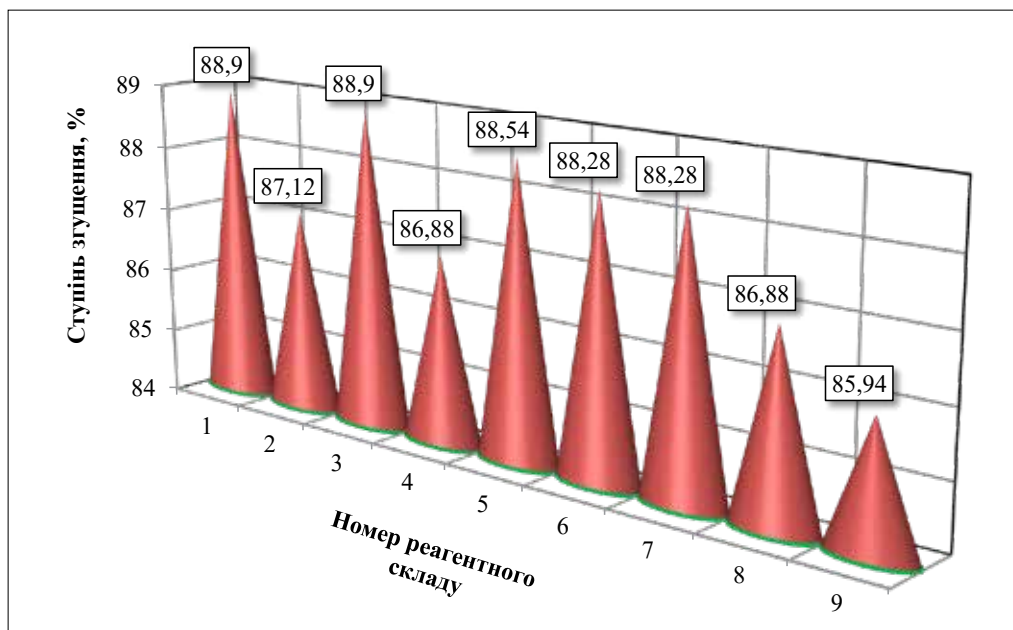


Рис. 3. Залежність ступеня згущення від реагентного складу коагуляційно-флокуляційного згущення суспензії мікродоростей

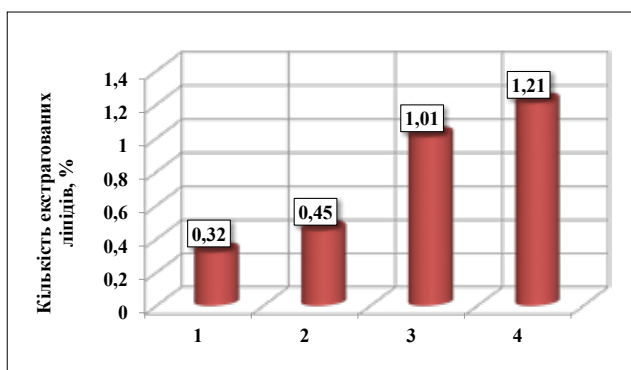


Рис. 4. Залежність кількості екстрагованих із ціанобактерій ліпідів (у % від сухої маси) від виду попередньої обробки біомаси: 1 – без попередньої обробки; 2 – після обробки в акустичному кавітаційному полі; 3 – після обробки в полі гідродинамічної кавітації; 4 – після віброкавітаційної обробки

Головні висновки. Запропонована концепція відкритого біологічного конвеєра для технології біологічного очищення стічних та поверхневих вод із використанням гідробіонтів.

Література

1. Гвоздяк П. За принципом біоконвеєра (Біотехнологія охорони довкілля). *Вісник НАН України*. Київ, 2003. № 3. С. 29–36.
2. Гвоздяк П.І. Біоконвеєр в оживленні «мертвої води» в ставку – накопичувачі токсичних промислових стоків. *Чиста Вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти: тези доповідей III міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Київ, 28-30 жовтня 2015 р. С. 72–73.
3. Мальований М.С. Оптимальні умови отримання енергії із ціанобактерій. *Хімічна промисловість України*. Київ. 2014. № 5. С. 39–43.
4. Мальований М.С. Раціональна технологія утилізації синьо – зелених водоростей. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів. 2015. Вип. 25.10. С. 140–149.

5. Крупей К.С. Очистка стічних вод заводу АТ «Мотор Січ» мікроорганізмами, іммобілізованими на штучних носіях. *Питання біоіндикації та екології*. Запоріжжя. 2014. Вип. 19, № 2. С. 224–236.
6. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. Москва : АКВАРОС, 2003. 512 с.
7. Шандрович В.Т. Моніторинг ефективності роботи аэротенків на Львівських очисних спорудах. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук. 2015. Вип. 1, ч. 1 (90). С. 126–132.
8. Malovanyu M. Two-stage landfill leachate treatment in aerated lagoons and at a municipal wastewater treatment plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv. 2018. № 1(10). P. 11–18.
9. Калужный С.В. Высокоинтенсивные анаэробные биотехнологии очистки промышленных сточных вод. *Каталіз в промисленості*. Москва. 2004. № 6. С. 42–50.
10. Malovanyu A. Concentration of ammonium from municipal wastewater using ion exchange process. *Desalination*. London. 2013. 329. P. 93–102.
11. Khin T., Annachhatre A.P. Novel microbial nitrogen removal processes. *Biotechnology Advances*. London. 2004. № 225. P. 19–532.
12. Dogaris I. Study of landfill leachate as a sustainable source of water and nutrients for algal biofuels and bioproducts using the microalga *Picochlorum oculatum* in a novel scalable bioreactor. *Bioresour Technol.* V. 282. P. 18–27.
13. Sniffen K.D., Sales C.M., Olson M.S. Nitrogen removal from raw landfill leachate by an algae–bacteria consortium. *Water Sci Technol.* London. 2015. V. 73. P. 479–485.
14. Sardi Saavedra A. Grupos funcionales fitoplanctónicos en una laguna algal de alta tasa usada para la biorremediación de lixiviados de rellenos sanitarios. *Acta Biolog Colombiana*, Bogota. 2018. V. 23. P. 295–303.
15. Villamagna A. M., Murphy B. R. Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. *Freshwater Biology*. London. V. 55. P. 282–298.
16. Flyurik E. Abramovich O., Zmitrovich A. Use of eichornia crassipes for sewage treatment and production feed additive. *Труди БГТУ*. Минск. 4. С. 155–160.
17. Lapan O. Water Purification from Ions of Cadmium (II) Using a Bio-Plateau. *Journal of Ecological Engineering*. Lublin. 2019. 20(11). P. 29–34.
18. Marzec M. The Efficiency and Reliability of Pollutant Removal in a Hybrid Constructed Wetland with Common Reed, Manna Grass, and Virginia Mallow. *Water*. 2018. London. V. 10. 1445. P. 1–18.
19. Jozwiakowski K. Technological reliability of pollutant removal in different seasons in one-stage constructed wetland system with horizontal flow operating in the moderate climate. *Separation and Purification Technology*. 2020. London. 238. P. 1–23.
20. Nykyforov V. The biotechnological ways of blue-green algae complex processing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv. 2016. № 5(10). P. 11–18.
21. Malovanyu M. Experimental investigation of *Microcystis aeruginosa* cyanobacteria thickening to obtain a biomass for the energy production. *Journal of water and land development*. Raszyn. 2019. V. 43(X–XII). P. 113–119.
22. Скляр О.Г. Скляр Р.В. Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2014. Херсон. В. 4. Т. 1. С. 3–9.
23. Nykyforov V.V. Developing a technology for treating blue-green algae biomass using vibro-resonance cavitators. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро. 2019. № 6. С. 181–188.