

СПОРУДА БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ – БІОПЛАТО BIOWT

Степова О.В., Тягній Л.М.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

пр. Віталія Грицаєнка, 24, 36011, м. Полтава

nning.stepovaov@nupp.edu.ua, tjagnij94@gmail.com

Постановка проблеми. На сьогоднішній день основною причиною забруднення водних об'єктів є скидання недостатньо очищених господарсько-побутових стічних вод від різних галузей промисловості [1-5]. Особливо це стосується тих виробників де використовують при виробництві мінеральний фосфор.

Актуальність дослідження. Основна проблема це відсутність технологій захисту в Україні з використанням біоти, які використовуються в новітніх технологіях захисту водного об'єкта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В розвинутих країнах таких як Японія, Франція, Італія, Швеція, Бельгія популярне використання в біоплато на природних популяціях біоти. В своїх дослідженнях Мітчелл і Ламперт вибрали *Daphnia magna* в якості основної біоти та опублікували в своїх працях, про термопластичність її до температур ідеально підходить до біоплато [1-18].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. За матеріалами доповіді Ricci та Covin в матеріалах X Міжнародного симпозіуму ротификаторів, що відбувся в Ільмітц, Австрія [3] коловертки та *Daphnia* досліджувались в біологічному ставку в здатності зниження концентрацій біогенних речовин, а також їх здатність до ангідробіозу (можуть вмерзати в лід а при відтаюванні оживати) де відбувається накопичення незнижувальних дисахаридів трегалоза (у тварин й грибів) або сахарози (в насінні рослин), що захищають білки та мембрани від зміни молекул води та агентів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Велика кількість фосфору в стічних стоках потрапляє в водний об'єкт, що призводить до забруднення поверхневих вод водних об'єктів. Раніше до появи такої кількості фосфатів в водоймах та водотоках біота була стійкою, що забезпечувало тривалий час процесам самоочищення води. Збільшення такої великої кількості біогенних елементів (N, P) в складі стічних вод призводить до евтрофікації водойм, тому потребує змін та технологій захисту водного об'єкта.

Методологічне або загальнонаукове значення. Об'єктом дослідження є біологічна споруда біоплато – BioWT, в якій пропонується застосувати на природних популяціях біоти в якості «тест-об'єктів», з метою контролю та доочищення стічних вод після КОС міста. Найбільш сприятливою біотою в використанні в біоплато є коловертки та *Daphnia*, а особливо важно поєднати з водорістю *Chlorella vulgaris*, яка поглинає біогенні елементи. Після очистки стоки з біотою скидаються в водний об'єкт, тим покращуючи та зберігаючи зникаючі види біоценозів.

Новизна. Відмінною унікальністю технології є відсутність хімічних реагентів, що є абсолютно безпечним для навколишнього середовища, не потребує особливих капіталовкладень, та легко модернізується в біологічний існуючий ставок на території очисної станції. Стічні води, що пройшли очищення в біологічних ставках, можуть застосовуватися для зрошення полів із застосуванням техніки або без.

Недолік технології захисту навколишнього середовища. Основним недоліком біоплато BioWT це використання в холодний період року при температурі води нижче плюс 6 °C здатність очищення на природних популяціях біотою різко знижується.

Ключові слова: біоплато BioWT, *Chlorella vulgaris* Beijer, *Daphnia*, коловертки.

Biological treatment facility – bioWT bioplateau. Stepova O., Tiahnii L.

Problem statement. Today, the main cause of pollution of water bodies is the discharge of insufficiently treated domestic wastewater from various industries [1-5]. This is especially true for those manufacturers where mineral phosphorus is used in production.

Relevance of the study. The main problem is the lack of protection technologies in Ukraine using biota, which are used in the latest technologies for protecting water bodies.

Analysis of recent studies and publications. In developed countries such as Japan, France, Italy, Sweden, Belgium, the use of bioplateaus on natural populations of biota is popular. In their studies, Mitchell and Lampert chose *Daphnia magna* as the main biota and published in their works that its thermoplasticity to temperatures is ideally suited to bioplateaus [15-18].

The connection of the author's work with important scientific and practical tasks. According to the materials of the report by Ricci and Covin in the materials of the X International Symposium of Rotifiers, held in Illmitz, Austria [3] rotifers and *Daphnia* were studied in a biological pond in the ability to reduce the concentrations of biogenic substances, as well as their ability to anhydrobiosis (can freeze into ice and come to life when thawed) where the accumulation of non-reducing disaccharides trehalose (in animals and fungi) or sucrose (in plant seeds) occurs, which protect proteins and membranes from changes in water molecules and agents.

Isolation of previously unresolved parts of the general problem, which is the subject of this article. A large amount of phosphorus in sewage enters the water body, which leads to pollution of surface waters of water bodies. Previously, before the appearance of such a large amount of phosphates in reservoirs and watercourses, the biota was stable, which provided a long time for the processes of self-purification of water. The increase in such a large number of biogenic elements (N, P) in the composition of wastewater leads to eutrophication of water bodies, therefore, it requires changes and technologies for protecting the water body.



Methodological or general scientific significance. The object of the study is the biological structure of the bioplateau – BIOWT, in which it is proposed to use biota on natural populations as “test objects” in order to control and further treat wastewater after the city’s wastewater treatment plant. The most favorable biota for use in the bioplateau are rotifers and *Daphnia*, and it is especially important to combine it with the algae *Chlorella vulgaris*, which absorbs biogenic elements. After treatment, the effluents with biota are discharged into the water body, thereby improving and preserving endangered species of biocenoses.

Novelty. A distinctive feature of the technology is the absence of chemical reagents, which is absolutely safe for the environment, does not require special capital investments, and is easily modernized in an existing biological pond on the territory of the treatment plant. Wastewater that has been treated in biological ponds can be used for irrigation of fields with or without the use of equipment.

Disadvantage of environmental protection technology. The main disadvantage of the BioWT bioplateau is its use in the cold season at water temperatures below plus 6 ° C, the purification ability of natural populations of biota is sharply reduced. *Key words:* BioWT bioplateau, *Chlorella vulgaris* Beijer, *Daphnia*, rotifers.

Викладення основного матеріалу. Важливу роль у процесі зниження концентрації біогенних елементів в складі стічних вод відіграють біохімічні та фізико-хімічні процеси [1-15]. Роль окремих мікроорганізмів в процесах очищення залежить від конкретних умов для існування біомаси, а саме – кисневого режиму, ступеня турбулентності, температурного режиму, гідрохімічного фону та деяких інших.

Для досягнення мети виконані дослідження процесів очищення в біоплато BioWT до КОС міста, а саме біохімічні та фізико-хімічні процеси по зниженню концентрації біогенних елементів в складі стічних вод біотою. Перед початком дослідження визначена потрібна біота, яка допоможе знизити концентрації біогенних елементів, таких як N, P та розроблена біологічна очисна споруда.

Основні природні процеси очищення в біологічних ставках це фільтрація та седиментація, засноване на здатності біоценозів здійснювати трансформацію, деструкцію, акумуляцію мінеральних та органічних, зважених речовин, біогенних елементів й бактеріального забруднення.

До переваг біологічної очистки стічних вод у біоплато можна віднести: низькі капітальні витрати; мінімальні експлуатаційні витрати; високу експлуатаційну надійність; простоту експлуатації; високий рівень очищення; високий рівень видалення азоту та фосфору; необмежений термін експлуатації; відсутність запаху; можливість збільшення потужності очисних споруд; можливість очищення суміші зливових та виробничо-побутових стічних вод; можливість використання як системи доочищення для існуючих очисних споруд; виділені водорістю *Chlorella vulgaris* фітонциди сприяють знезараженню води, де зміст кишкових паличок знижується майже 99 % від початкової концентрації. А вміст яєць гельмінтів практично зводиться нанівець.

Найважливішим фактором очищення є гідроліз, в результаті якого забруднення, що надійшли у воду, піддаються глибоким змінам. При гідролізі амонійних солей, з утворенням гідрату окису амонію спостерігається зниження його концентрації через летючість аміаку [1-19].

Розроблена нами модель біоплато BioWT (рис. 1) являє собою виритий прямокутний витягнутий котлован (1) по ходу руху води. Співвідношення довжини до ширини котловану повинно бути 3:1. Щоб

уникнути утворення застійних зон стічну воду подають розсерджено, відстань між впусками 5-10 м при БПК_{повн} не менше 200 мг/л та 10-15 м при БПК_{повн} більше 200 мг/л. Загальне зниження концентрації забруднення по БПК_{повн} досягає 60-98%, а по зваженим речовинам 90-98%.

Напуск стічної води з труб з труб з КОС (9), які мають заслонку дискову (баттерфляй) (3) та відведення очищених вод з біотою (2) із біоплато проводиться розосереджено. Для того, щоб споруду можна було спорожнити, дно проектується з невеликим ухилом у напрямку до водозливних споруд.

В гідробіологічній споруді ставка запропонована система аерації (8) з використанням аераторів (7), глибиною не менше 2 м на дні. З боку напуску стічної води подається насосами біота – (4, 5, 6) в споруду, де створюються сприятливі умови для розвитку водних організмів, які описані в методі «Bioindication Water Test» (рис. 1). Штучна аерація в біоплато дає можливість значно інтенсифікувати процеси біохімічної очистки стічних вод, збільшити глибину до 3-4 м, що стабілізує процеси та дозволяє зробити його компактним.

Розрахунок площі біоплато визначається за формулою [22, 23]:

$$F = C_p Q (L_a - L_t) / \alpha (C_p - C) \cdot r \text{ м}^2 \quad (1)$$

де C_p – розчинність кисню в воді, мг/л; Q – витрата стічних вод, м³/сут;

α – характеризуючий коефіцієнт частки площі активної поверхні біоплато від загальної, який приймається 0,8-0,9; C – концентрація розчиненого кисню, складає 5 мг/л; r – коефіцієнт штучної аерації, г/м² в сут.

До моделі BioWT підбирається аероційна система, яка насичує воду киснем через аератори – це основа біологічного процесу очищення стічних вод в очисних спорудах.

Аератори призначені для рівномірного розподілу повітря, що подається від компресора або повітродувки, в товщі води [5, 6, 18, 19, 20].

Аерація здійснюється шляхом подачі повітря через аератори, які представлені на ринку різними типами (пластинчасті, трубчасті, тарілчасті (дисккові)).

Система аерації пневматична через фільтрувальні труби (7, 8), укладені в залізобетонній споруді біоплато вздовж пола (рис. 1), аеруються поздовжними

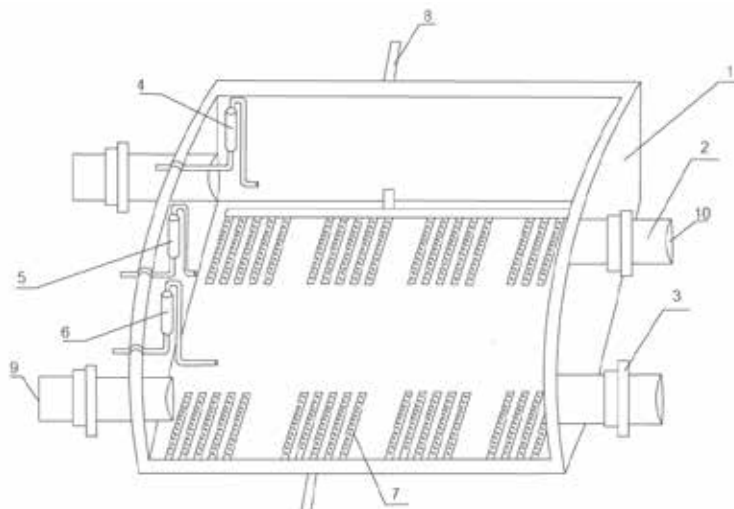


Рис. 1. Гідробіологічна споруда якості біоплато BioWT до КОС міста

1 – прямокутний витягнутий котлован (резервуар) залитий бетоном; 2 – напуск стічної води з труб після очистки; 3 – заслонка дискова (баттерфляй); 4, 5, 6 – насоси з подачею біоти; 7, 8 – аераційна система; 9 – напуск стічної води з труб з КОС; 10 – випуск очищеної води з біотою.

дірчастими трубами для підтримки мікроорганізмів в підвищеному стані.

Концентрація кисню визначає величину окислювально-відновлювального потенціалу та значною мірою направленням й швидкістю процесів хімічного та біохімічного окислення органічних і неорганічних з'єднань. Органічні речовини в стічних водах присутні у колоїдному та розчиненому стані, а біота їх руйнує на молекули різних сполук та використовуючи для свого живлення, розмноження та збільшення маси біологічної. Мінімальне значення розчиненого кисню для нормального розвитку біоти складає приблизно 5 мг/л, зниження його до 2 мг/л може призвести до замору. Не благополучно впливає на стан біоти в біоплато перенасичення надлишком воду киснем в результаті процесу фотосинтезу при недостатньо інтенсивному перемішуванні в шарі води. Утворення вуглекислого газу в біоплато утворюється з процесом дихання біоти та розкладанні органічних речовин (рис. 2).

Він добре розчиняється в воді та міститься в великій кількості чим в атмосферному повітрі. Сірководень утворюється при гнитті білкових речовин, тому стічна вода забруднена органічними залишками, пахне сірководнем. Цей газ дуже ядовитий і навіть в невеликих кількостях шкідливий, так як при 20°C в 1 л води розчиняється 2500 мл сірководню. Метан утворюється при розкладанні клітковини та міститься в бульбашках, які піднімаються із дна стоячого біологічного ставка, ядовитий, тому потрібне перемішування води. В біоплато відсутні витискувачи, перемішувачи, сточні води разом з активним мулом рухаються в споруді, де в результаті окислення концентрація забруднень зменшується по довжині біологічної споруди.

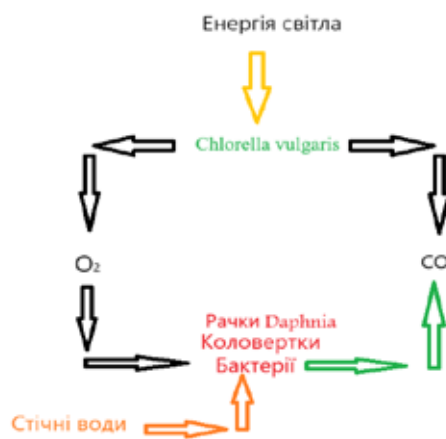


Рис. 2. Схема клітинного метаболізму

Для ефективної стабілізаційної роботи біологічної споруди використовувати разом водорості та бактерії (активний мул з аеротенку КОС). Бактерії розщеплюють складні органічні компоненти відходів аеробним й анаеробним шляхом у прості елементи, які потім доступні для споживання водоростями, а вони, у свою чергу, виробляють кисень, необхідний для підтримки аеробного середовища, що необхідний бактеріям для виконання окислювальних функцій.

Хоча бактерії та водорості є основними організмами, за допомогою яких здійснюється стабілізація очищених стоків, вищі форми життя також мають велике значення.

Основною біотою в використанні в біоплато BioWT до КОС міста вибрано 3 види:

1) Рачки *Daphnia*. Планктонні рачки *Daphnia* вважаються найбільш значущою фауною у ставко-

вому співтоваристві з точки зору стабілізації органічної речовини. *Daphnia* живляться водоростями та сприяють флокуляції та осіданню твердих частинок [10-12].

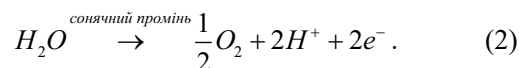
2) Коловертка *Rotaria rotatoria* рід *Bdelloidea*. Досліджували коловертки *Rotaria rotatoria*, які живляться фільтруванням води, використовуючи добре розвинені корональні війки, які в живильній канавці втягують одноклітинну водорість, бактерії, інфузорію, найпростіші, фітопланктон й органічний детрит, розмір якого не перевищує 10 мкм, подаючи їх в щічне поле, а потім у рот. Вони змінюють свою харчову поведінку в залежності від умов навколишнього середовища й кількості поживних речовин [13, 14]. Взасмодіючи коловертка з *Daphnia* може виживати як ендопаразит за допомогою безхребених, живучи за рахунок рідин свого організму.

У той час як більшість коловерток є планктонними і вільно плаваючими, інші, такі як ті, що належать до родин *Bdelloidea*, *Atrochidae*, *Collothecidae* та *Flosculariidae*, є сидячими та прикріплюються до субстрату. Деякі рухливі коловертки також стеляться по дну водойми. Коловертки мають коротку тривалість життя, зазвичай становить від 6 до 45 днів.

3) одноклітинна зелена водорість *Chlorella vulgaris* [16 – 22]. Одноклітинна *Chlorella vulgaris* являє собою групу водних водоростей що, має фотосинтетичні пігменти. Будучи автотрофною, ця водорість використовує неорганічні поживні речовини, такі як фосфат, вуглекислий газ та азот. Водорість не фіксує атмосферний азот, але потребує неорганічного азоту у формі нітрату або аміаку. Також деякі здатні використовувати амінокислоти та інші органічні сполуки азоту. Неорганічні поживні речовини, що використовуються водоростями, фотосинтетично перетворюються на клітинні органічні матеріали, а кисень утворюється як побічний продукт. Фосфор видаляється шляхом асиміляції в клітинах водоростей та шляхом осадження. Коли лужність підвищується протягом світлового дня, фосфат випадає в осад та осідає [20, 21]. Перетворення азоту в різні форми відбувається метаболізмом водорості або бактерій, кожен з них знижує концентрацію загального азоту. При видаленні аміаку у факультативних ставках концентрація зменшується, та може сягати до 99%.

Хлоропласти водорості *Chlorella vulgaris* містить хлорофіл-а та хлорофіл-б, зелений пігмент який утворюється в процесі фотосинтезу. Формула хлорофілу $-C_{55}H_{72}MgN_4O_5$. Сполука хлорофіл-а потрібна водорості для перетворення енергії світу в хімічну енергію, а хлорофіл-б уловлює сонячні промені та передає енергію на хлорофіл-а. Вміст пігментів у цих зелених водоростях є одним з показників стану та функціонуванню фотосинтезу.

У кисневому фотосинтезі вода служить джерелом відновлювальної енергії, причому кисень виробляється як побічний продукт, та має вигляд:



Для *Chlorella vulgaris* характерна висока ефективність фотосинтезу [19-21]. Вона здатна уловити більше 70% сонячного світла, тоді як більшість вищих рослин – до 3% та перетворювати 9-10% сонячної енергії в біомасу з теоретичним виходом приблизно 280 т/га в рік. В макро- та мікроелементний склад суспензії *Chlorella* входить Ca, Mg, K, Cu, Fe, S, Zn, Co, Mn, Zr, Mo, Rb, I, та інші [18].

Chlorella vulgaris була відкрита в 1980 році М.В. Беєринком як перша мікроводорість з ярко вираженим ядром [20].

Обговорення результатів досліджень. В ході дослідження з виявлено у рачків *Daphnia* перфузію та властивості гемоглобіну є центральними контрольними змінними для адаптації транспорту кисню до змінних енергетичних потреб при різних температурах навколишнього середовища. Виняткові переваги *Daphnia* як експериментального модельного організму дозволили підтвердити на поведінковому, фізіологічному та біохімічному рівнях, що теплова акліматизація значною мірою базується на адаптації транспорту кисню, що дозволяє зробити зміни в діапазоні термічної толерантності до більш теплих або холодних температур.

Будучи важливою частиною системи транспортування кисню, гемоглобін (Hb) також дуже важливий для термпереносності. Здатність до синтезу гемоглобіну, здається, генетично закріплена, та *Daphnia* зі зростаючою здатністю до індукції гемоглобіну збагачуються взимку і до літа. Дослідники досліджуючи термопластичність Мітчелл і Ламперт заявили, що *Daphnia magna* з різних широт Європи живе в умовах 4–23 °C на півночі Німеччини, 15–25 °C поблизу України завдяки контролю життєвого циклу (вилуплення, статеве розмноження) за ознаками навколишнього середовища (наприклад, температурою). Прямого впливу температури на цілі популяції з різних широт виявлено не було, ймовірно, через схожість умов їх життя. Однак відносна придатність клонів з однієї популяції залежала від температури, і в популяціях спостерігалися генетичні варіації щодо термопластичності. Вплив акліматизації на поведінкову терморегуляцію *Daphnia* було показано в кількох дослідженнях [10, 11]. У *Daphnia magna* транспорт кисню в гемолімфі регулюється відповідно до парціального тиску кисню навколишнього середовища або концентрації, з якою стикаються тварини в основі якого лежить диференціальний гемоглобін.

За допомогою грудних кінцівок *Daphnia* харчується органічними частинками відфільтровуючи воду через апарат, проганяючи через себе від 1 до 6 мл./сут. *Daphnia* втягуючи в стоках бактерії та одноклітинні водорості. Їжа відфільтровується віями фільтруючих щетинок, які розташовані на ендоподитах

III та IV пар грудних ніг. Великі частинки, що застрягли у фільтраційному апараті (наприклад водорості), видаляються за допомогою постабдомену та його кігтів. З фільтруючих віялів їжа надходить у черевний харчовий жолобок. Спереду ротовий отвір прикритий великою верхньою губою, всередині якої розташовані слинні залози з гігантських поліплоїдних клітин. Їх секрет склеює частинки їжі в харчову грудку.

В дослідженнях проведених нами виявлено здатність *Daphnia* до термічної толерантності безпосередньо з постачанням кисню у зв'язку з потребою в енергії на додаток до паралельних коригувань на молекулярному та мембранному рівні. В оптимальному діапазоні аеробний обсяг (тобто збільшення швидкості метаболізму між спокоєм і розвитком) є максимальним, що призводить до оптимальної фізичної форми.

Ще досліджено, що кліткові стінки *Chlorella vulgaris* міцні трирівневі, кліткова стінка складається з целюлози, геміцелюлози, пектиноподібних речовин, а також білків, уронових ксилот, манози, ксилози. Якісний склад кліткової стінки непостійний та залежить від умов середовища перебування [19-21].

Хлоропласт широкопопяскоподібний, незамкнений. Він включає структуру, звану піреноїдом. Крім того, в ньому містяться крохмальні зерна та ліпідні краплі. Жгутиків, скорочувальних вакуолей хлорела не містить.

Клітини *Chlorella vulgaris* здатні вільно розподілятися у середовищі культивування, вони не осідають у стані спокою протягом 6-15 діб. Культура не вимоглива до живильного середовища та наявності вуглекислого газу в ній, при культивуванні не вимагає механічного перемішування. Оптимальна температура для зростання 24–28 °С, при більш високій температурі можливий прояв хлорозу. *Chlorella vulgaris* добре росте при природному освітленні. При досягненні щільності клітин 3 млн/мл виявляються антагоністичні властивості на бактерії, інфузорій, коловертку, тому при культивуванні водорості не потрібні стерильні умови. Немає необхідності також стежити за змінами рН- середовища або штучно його регулювати, тому що відхилення величин рН настають у результаті природних фізіологічних процесів та не перевищують допустимих значень [20 – 22].

Висновки. В ході досліджень зроблено висновки, що неорганічний фосфор, переважно у формі ортофосфату, легко засвоюється біотою. Деякі організми можуть накопичувати надлишок фосфору як поліфосфат для майбутнього споживання.

Видалення фосфору у біоплато BioWT може бути результатом таких фізичних механізмів, як адсорбція, коагуляція та осадження. Поглинання Р організмами в метаболічних функціях, а також для зберігання, що також може сприяти видаленню фосфору.

Ефективність видалення Р в біоставках з використанням біоти коливається від 30 до 95%. Подібно до N, Р який споживається водоростями перетворюється в органічну форму.

Перед початком проведення підготовчих робіт щодо реконструкції існуючого біологічного ставка на території КОС потрібно щоб вибрана ділянка мала відстань від житлових будівель не менше 500 метрів, а ґрунт повинен мати коефіцієнт водопроникнення від 7-10 м/с, а коли більше 10 м/с то потрібно облицювання біоплато. Виритий котлован повинен мати ґрунт з ущільненням шару 250 мм. З метою захисту від ерозії ґрунту поряд з котлованом висаджується трава, яка росте повільно.

При будівництві дотримуватись фізичних факторів до біоплато. Фізичні фактори, такі як співвідношення довжини та ширини, визначають фактичну ефективність очищення.

Якщо не приділити належної уваги до конфігурації моделі біологічного ставка то фактична ефективність може бути набагато нижчою за розраховану, так як фізичний фактор важливий, як і біологічний.

Біологічні фактори, впливають на продуктивність ставка в очищенні стічних вод, в основному використовуються для оцінки необхідного гідравлічного часу перебування для досягнення заданої ефективності.

Відповідно до моделі конструкції співвідношення довжини до ширини повинно бути 3:1 або більше. З метою недопущення забруднення ґрунтових вод просочуванням стічних вод, потрібна герметизація резервуара бетоном. Розміри резервуара впливають на схеми течії в ставку та визначають експлуатаційні можливості контролю рівня води та швидкості скиду очищеної води.

Перспективи використання результатів дослідження. Пропонується застосувати в доочистці стоків від аеротенка від двох та до п'яти секцій біоплато BioWT на території КОС міста.

Конфлікт інтересів. Автори Степова, О.В., Тягній Л.М. декларують, що не маємо конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Фінансування. Дослідження проводилось з власної фінансової підтримки.

Література

1. Pörtner H. O. Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography systemic to molecular hierarchy of thermal tolerance in animals *Comp. Biochem.* 2002. Vol. 132, № 4. P.739–761. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S1095-6433\(02\)00045-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1095-6433(02)00045-4).
2. Wiggins P. R. Behavioural thermoregulation in *Daphnia carinata* from different depths of a natural water body influence of environmental oxygen levels and temperature *Comp. Biochem.* 2002. Vol. 133, № 3. P. 771–780. DOI: 10.1016/S1095-6433(02)00238-6.

3. Herzig A., Ramesh D., Christian D., Jersabek P. Rotifera X : Rotifer Research. Trends, New Tools And Recent Advances. *Springer*. 2010. P. 602.
4. Henze M., Harremoës P., Jansen J., Arvin E. Wastewater Treatment Lyngby. *Springer-Verlag Telos*. 1997. P. 383.
5. Søborg D. A., Breda I. L., Ramsay L. Effect of oxygen deprivation on treatment processes in a full-scale drinking water biofilter. *Water Sci. Technol. Water Supply*. 2015. № 4. P. 825–833.
6. Jun Y., Wenfeng X. Ammonia biofiltration and community analysis of ammonia-oxidizing bacteria in biofilters / *Bioresour. Technol.* 2009. № 17, P. 3869–3876. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.03.021.
7. Konrád L. Ammonium removal by nitrification in drinking water treatment / *Kvalitet Voda*. 2012. Vol. 9, № 10. P. 47–53.
8. White C. P., DeBry R. W., Lytle D. A. Microbial survey of a full-scale, biologically active filter for treatment of drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.* 2012. № 17. P. 6390–6394. DOI: 10.1128/AEM.00308-12.
9. Chu S. P. The influence of the mineral composition of the medium on the growth of planktonic algae / *J. Ecol. Part I. Methods and culture media*. 1942. № 30. P. 284–325.
10. Maki A. W., Bishop W. E. Acute toxicity studies of surfactants to *Daphnia magna* and *Daphnia pulex*. *Environ. Contam. and Toxicol.* 1979. № 5. P. 599–612.
11. Naumann E. *Daphnia magna* Straus als Versuchstiere / E. Naumann. *Kgl. Fysiog. Saliskap. Lund for hunde*. 1933. № 2. P. 1–49.
12. Poirier D. G., Westlake G. F., Abernethy S. G. *Daphnia magna* Acute Lethality Toxicity test protocol. *Queen's Printer for Ontario*, 1988. P. 32.
13. Segers H. Global diversity of rotifers (*Rotifera*) in freshwater. *Hydrobiologia*. 2008. № 595. P. 49–59.
14. Stemberger R. S., Gilbert J. J. Spine development in the rotifer *Keratella cochlearis*: induction by cyclopoid copepods and *Asplanchna* / *Freshwater Biol.* 1984. Vol. 14, № 6. P. 639–647.
15. Taub F. B., Dollar A. M. The nutritional inadequacy of *Chlorella* and *Chlamydomonas* as food for *Daphnia pulex*. *Limnology and Oceanography*. 1968. Vol. 13, № 4. P. 607–617.
16. Welch M., Meselson M. Evidence for the evolution of bdelloid rotifers without sexual reproduction or genetic exchange. *Science*. 2000. № 20. P. 2111–2115.
17. Swader J. A. Studies on the mechanism of copper toxicity in *Chlorella*. Arturo Cedeno-Maldonado and Swader J. A. *Weed Science*. 1974. № 25. P. 443–449.
18. Chapman J. C. The role of ecotoxicity testing in assessing water quality. *Australian Journal of Ecology*. 1995. Vol. 20, № 1. P. 20–27.
19. Christensen E. R., Dixon P. S. Effects of manganese, copper and lead on *Selenastrum capricornutum* and *Chlorella stigmatophora*. *Water Research*. 1979. Vol. 13, № 1. P. 79–92.
20. Garnharm G. W., Codd G. A., Gadd G. M. Kinetics of uptake and intracellular location of cobalt, manganese and zinc in the estuarine green alga *Chlorella salina*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1992. № 37. P. 270–276.
21. Gross R. E., Pugno P., Dugger W. M. Observations of the mechanism of copper damage in *Chlorella*. *Plant Physiology*. 1992. Vol. 46, № 2. P. 183–185.
22. Safi C. Influence of microalgae cell wall characteristics on protein extractability and determination of nitrogen-to-protein conversion factors / Safi C., Charton M., Pignolet O., Silvestre F., Vaca-Garcia C., Pontalier P. *Journal of Applied Phycology, Springer Verlag*. 2013. Vol. 25, № 2. P. 523–529.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026