

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Факультет хімічних та біофармацевтичних технологій

Кафедра біотехнології, шкіри та хутра

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему**

«Біологічне очищення промислових стоків

з використанням мікробних паливних елементів»

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 162 Біотехнології та біоінженерія

Освітня програма Біотехнологія високомолекулярних сполук

Виконала: студентка 2 курсу, групи МгБТ-23  
спеціальності 162 Біотехнології та біоінженерія

Мартинюк К.В.

Науковий керівник д.т.н., проф. Андреева О.А.

Рецензент д.б.н., проф. Щербатюк Т.Г.

Київ 2024

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Факультет	<u>хімічних та біофармацевтичних технологій</u>
Кафедра	<u>біотехнології, шкіри та хутра</u>
Рівень вищої освіти	<u>другий (магістерський)</u>
Спеціальність	<u>162 Біотехнології та біоінженерія</u>
Освітня програма	<u>Біотехнологія високомолекулярних сполук</u>

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри БШХ

\_\_\_\_\_ Олена МОКРОУСОВА

«\_\_\_\_\_» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ  
Мартинюк Катерині Владиславівні**

1. Тема кваліфікаційної роботи: **Біологічне очищення промислових стоків з використанням мікробних паливних елементів**

Науковий керівник роботи Андреєва Ольга Адіславівна, д.т.н., проф.  
затверджені наказом КНУТД від «03» вересня 2024 року №188-уч.

2. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: завдання на кваліфікаційну роботу; наукова література щодо традиційних та сучасних підходів до очищення промислових стічних вод, доцільності використання мікробних паливних елементів; матеріали науково-дослідної практики, переддипломної практики.

3. Зміст кваліфікаційної роботи: перелік скорочень, умовних позначень; вступ; огляд літератури; технологічна частина; контроль якості; висновки; список використаних джерел; додатки.

4. Дата видачі завдання 06.08.2024 р.

## АНОТАЦІЯ

**Мартинюк К.В. Біологічне очищення промислових стоків з використанням мікробних паливних елементів. – Рукопис.**

Кваліфікаційна робота за спеціальністю 162 Біотехнології та біоінженерія.  
– Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2024 рік.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню технології біологічного очищення промислових стічних вод з використанням мікробних паливних елементів (МПЕ).

Проведено пошук, аналіз та систематизацію науково-технічної літератури у напрямку традиційних та перспективних підходів до очищення стічних вод у різних галузях промисловості. Розглянуто методи та загальні технологічні схеми очищення промислових стоків. Обґрунтовано доцільність біологічного очищення стічних вод з використанням біоелектрохімічних систем у вигляді мікробних паливних елементів з одночасною генерацією електричної енергії, що полягає у суттєвому зменшенні навантаження на екологічні системи. Проведено аналіз штамів мікроорганізмів, необхідних для формування цих систем.

Удосконалено існуючу технологічну схему біологічного очищення промислових стоків шляхом інтегрування мікробних паливних елементів з генерацією власної електроенергії. Запропоновано сучасне технологічне обладнання для реалізації розробленого технічного рішення. Визначено методи контролю якості стічних вод.

*Ключові слова:* біотехнологія, промислові стоки, якість, біологічне очищення, мікробний паливний елемент, мікроорганізми, електрична енергія, технологічна схема.

## ANNOTATION

### **Martyniuk K.V. Biological treatment of industrial wastewater using microbial fuel cells.**

Qualification work in the speciality 162 Biotechnology and bioengineering. – Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2024.

The qualification work is devoted to the study of the technology of biological treatment of industrial wastewater using microbial fuel cells (MFC).

A search, analysis and systematization of scientific and technical literature was carried out in the direction of traditional and promising approaches to wastewater treatment in various industries. Methods and general technological schemes for industrial wastewater treatment were considered. The feasibility of biological wastewater treatment using bioelectrochemical systems in the form of microbial fuel cells with simultaneous generation of electrical energy was substantiated, which consists in a significant reduction in the load on ecological systems. An analysis of the strains of microorganisms necessary for the formation of these systems was carried out.

The existing technological scheme for biological treatment of industrial wastewater was improved by integrating microbial fuel cells with the generation of its own electricity. Modern technological equipment was proposed for the implementation of the developed technical solution. Methods for wastewater quality control were determined.

*Keywords:* biotechnology, industrial wastewater, quality, biological treatment, microbial fuel cell, microorganisms, electric energy, technological scheme.

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГДК – гранично-допустимі концентрації;

БСК – біохімічне споживання кисню;

ХСК – хімічне споживання кисню;

ПАР – поверхнево-активні речовини;

СПАР – синтетичні поверхнево-активні речовини;

МПЕ – мікробні паливні елементи;

UASB – (upflow anaerobic sludge blanket reactor) висхідний анаеробний реактор з муловим покривом

## ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	7
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	10
1.1 Промислові стічні води: характеристика, склад .....	10
1.2 Традиційні підходи до очищення промислових стічних вод.....	11
1.3 Інноваційні методи, розробки та перспективи в сфері очищення промислових стічних вод .....	14
1.4 Біологічне очищення стічних вод з використанням мікробних паливних елементів.....	17
Висновки до розділу 1 .....	19
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	20
2.1 Нормативи очищення промислових стічних вод .....	20
2.2 Вибір і характеристика мікробних паливних елементів .....	23
2.2.1 Конфігурації МПЕ, особливості вибору матеріалів і компонування системи .....	25
2.2.2 Характеристика мікроорганізмів для створення МПЕ .....	29
2.3 Вибір і характеристика технологічної схеми промислового водоочищення. ....	33
2.3.1 Загальні технологічні схеми промислового водоочищення .....	33
2.3.2 Технологічна схема з інтегрованим мікробним паливним елементом .....	36
Висновки до розділу 2 .....	42
3 КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ .....	44
3.1 Методи контролю якості стічних вод на вміст у них забруднювачів .....	44
3.2 Приклади оцінювання ефективності біологічного очищення води з використанням МПЕ.....	48
Висновки до розділу 3 .....	51
ВИСНОВКИ .....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	54
ДОДАТКИ .....	62

## ВСТУП

На сьогоднішній день досить гостро постає питання збереження навколишнього середовища від антропогенного впливу людини. Кількість населення невідомо зростає, обсяги промисловості, що чинить негативний вплив на баланс екосистем, збільшуються. Потреби людства повільно зміщуються з особистих в сторону базових і загальнолюдських, отже, потреба в чистій питній воді одна з найактуальніших проблем сьогодення.

Промислові стічні води становлять найбільшу загрозу життю та здоров'ю людей і тварин, саме тому контроль за промисловими стоками повинен здійснюватись більш ретельно, а способи очищення мають бути в рази ефективнішими.

Існує багато технологій очищення промислових стічних вод у вигляді як традиційних, так і новітніх нестандартних підходів, кожен з яких спрямований на видалення певних специфічних домішок для певної галузі промисловості.

Промислові підприємства сьогодні вважаються одними з основних джерел забруднення водойм через викиди висококонцентрованих і токсичних органічних речовин, а традиційні методи очищення, як фізико-хімічні, так і біологічні, мають низку недоліків, пов'язаних з використанням дороговартісних хімічних реагентів або утворенням відходів, що у подальшому буде складно утилізувати.

Використання мікробних паливних елементів є інноваційною технологією, яка поєднує в собі біологічне очищення промислових стічних вод з використанням біоелектрохімічного потенціалу мікроорганізмів для одночасної генерації електроенергії. Це робить дану технологію не лише екологічно чистою, але й вигідною в економічному плані, оскільки дозволить зменшити споживання електроенергії під час очищення за рахунок генерації власної електричної енергії.

*Актуальність дослідження* обумовлена необхідністю вирішення глобальної проблеми забруднення водойм важкими металами та іншими

токсичними сполуками, пошуком нових інноваційних методів і технологій, які будуть менш енерговитратними та більш ефективними для повного видалення забруднюючих речовин.

*Об'єктом дослідження* є промислові стічні води, що потребують ефективного очищення, а також мікробні паливні елементи, у той час як *предметом* є технологія біологічного очищення промислових стічних вод з використанням мікробних паливних елементів з одночасним генеруванням електричної енергії.

*Мета кваліфікаційної роботи* – визначити можливості застосування технології біологічного очищення промислових стічних вод з використанням мікробних паливних елементів шляхом розуміння біотехнологічної сутності та результативності цієї технології на основі пошуку, аналізу та систематизації науково-технічної літератури.

*Наукова новизна дослідження* полягає в упорядкуванні знань в області технологій очищення промислових стічних вод, в обґрунтуванні доцільності інтегрування мікробних паливних елементів на базі певних типів мікроорганізмів у відомі технологічні схеми біологічного очищення стічних вод.

*Практичну значимість роботи* становить удосконалення існуючої технологічної схеми біологічного очищення стічних вод шляхом використання мікробних паливних елементів та запропонованого технологічного обладнання. Результати роботи можуть бути корисними у подальших дослідженнях з підвищення ефективності технології очищення стічних вод у напрямку адаптації до різних типів стічних вод та інтеграції у будь-яку сферу виробництва з метою більш широкого впровадження принципів енергозбереження та зменшення екологічного навантаження як на виробництво, так і водні ресурси в цілому. Це сприятиме створенню стійких методів і технологій очищення забруднених промислових стоків.

З урахуванням сформульованої мети визначено наступні *завдання*:

- провести пошук науково-технічної літератури за даною темою;



- проаналізувати, систематизувати та узагальнити отриману інформацію для обґрунтування біологічного очищення стічних вод з використанням мікробних паливних елементів, на основі чого зробити відповідні висновки.

У роботі використано такі загальнонаукові теоретичні методи дослідження, як пошук, аналіз, узагальнення, систематизація, пояснення та класифікація.

Результати роботи висвітлені у тезах 8<sup>th</sup> International scientific and practical conference «Global science: prospects and innovations» та опублікованій статті (Додатки):

1. **Мартинюк К. В.,** Андреева О. А., (2024). Сучасні методи та перспективи біологічного очищення стічних вод. Global science: prospects and innovations. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International scientific and practical conference (March 28-30, 2024). Liverpool, United Kingdom: Cognum Publishing House, 43-51 [438 p.].

<https://sci-conf.com.ua/viii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-science-prospects-and-innovations-28-30-03-2024-liverpul-velikobritaniya-arhiv/>.  
ISBN 978-92-9472-196-9

2. **Мартинюк, К. В.,** Андреева, О. А., (2024). Ефективність інноваційних біологічних технологій у очищенні стічних вод. *Universum*, 11, 33-39.

DOI: 10.36074/universum.11.2024

*Структура та обсяг роботи:* перелік скорочень, умовних позначень; вступ; три розділи; висновки; список використаних джерел (74 найменування) і додатки. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи – 53 сторінки комп'ютерного тексту (без списку використаних джерел та додатків).

## РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Промислові стічні води: характеристика, склад

За визначенням Водного кодексу України стічними водами вважаються води, що утворились в процесі господарської або виробничої діяльності людини, а також в це поняття входить вода, що відводиться з забудованих територій [1].

Промислові стічні води характеризуються високими концентраціями забруднюючих речовин, специфічних для кожної окремої галузі. Зазвичай, це домішки великої дисперсності, такі як частинки сировини, пісок, земля, жири, волокна, а також присутність СПАР, барвників, дубильних речовин та важких металів, токсичних хімічних речовин тощо.

У стічних водах підприємств, наприклад, вовняної галузі переважають завислі частинки різної сировини у вигляді дрібних і крупних волокон та ворсинок, а також, відходи хімічних матеріалів, органічних і неорганічних речовин, СПАР, різноманітних препаратів, жирів, мінеральних солей і специфічних забруднюючих речовин – іонів деяких важких металів цинку, хрому, заліза, міді і тому подібних, які є складовими металкомплексних барвників.

Основними забруднюючими речовинами стічних вод шкіряної промисловості є токсичні хімічні речовини, наприклад, сполуки хрому, що застосовуються в процесі дублення, деякі інші речовини, а також окремі фрагменти та компоненти шкіри (мінеральні речовини, білки, жири тощо), які потрапляють у воду під час обробки сировини та шкіряного напівфабрикату. Загалом, стічні води шкіряної промисловості характеризуються високим вмістом органічних та неорганічних речовин, СПАР, високими значеннями показників ХСК і БСК, вмісту крупнодисперсних завислих речовин. Оскільки дана галузь промисловості використовує велику кількість води, об'єми стічних вод з високим вмістом забруднюючих речовин досить великі [2].

Однією з найголовніших проблем, пов'язаних з наявністю у промислових стічних водах сполук хрому, вважається хімічна універсальність хрому приймати різні ступені окиснення (характерні від +2 до +6). З одного боку, хром (III) є

незамінним поживним елементом, важливим у ланцюгу регуляції рівня глюкози в крові та дії інсуліну на тканини організму, а з іншого – хром (VI) визнаний канцерогеном, який в багато разів токсичніший за попередню конфігурацію і добре розчиняється у воді. Завдяки своїй високій мобільності хром гарно проникає в навколишнє середовище, де чинить різко негативний вплив на навколишнє середовище. Всередині людського організму хром чинить гепатотоксичну та імунотоксичну дію, сприяє розвитку шкіряних виразок і захворювань дихальної системи [3].

Вміст токсичних речовин у стічних водах харчової промисловості значно менший порівняно з іншими галузями. Однак, такі води все одно характеризуються високим вмістом органічних речовин, солей, мінералів, жирів, олій, цукру, завислих речовин, аміаку та хімічних речовин, що застосовуються для миття цехів і технологічного обладнання [4].

Стічні води агропромислового комплексу також чинять різко негативний вплив на водні об'єкти специфічністю забруднюючих речовин. Найчастіше цими забруднюючими речовинами виступають залишки пестицидів, інсектицидів та інших агрохімікатів, хімічних добрив, вимиті мінеральні солі, фосфор та азот, а самі стічні води характеризуються нерівномірністю надходження, високим ризиком просочування у підземні горизонти, високими значеннями показників ХСК та БСК. Крім того, останнім часом мінералізація дренажних вод агропромислового комплексу значно зросла, а їх складу притаманні високі показники вмісту важких металів та різних фекальних бактерій, що різко негативно впливає на екосистеми водойм і здоров'я людей у подальшому [5].

## **1.2 Традиційні підходи до очищення промислових стічних вод**

На сьогоднішній день питання правильного очищення промислових стічних вод є досить важливим питанням. Під поняттям «правильне» мається на увазі компетентність стосовно вибору доцільних методів очищення, а також технологічних схем, реагентів, обладнання, тощо.

Загалом існує низка основних традиційних методів очищення стічних вод: фізико-хімічні, механічні та біологічні. Кожен метод може застосовуватись окремо або комбінуватись в технологічній схемі, вибір і раціональне застосування буде залежати від витрат води, вихідних концентрацій та вихідного складу води, а також, природи забруднюючої речовини. Для забезпечення ефективного очищення промислових стічних вод і вибору доцільних методів, схем і технологій потрібно правильно проаналізувати та охарактеризувати їх склад [6].

**Фізико-хімічні методи очищення води** сьогодні є найбільш поширеними через свою швидкість та ефективність. Суть фізико-хімічного очищення стічних вод полягає у використанні спеціальних хімічних речовин, при додаванні яких дрібнодисперсні домішки вступають з ними в реакцію, в результаті якої відбувається їх злипання. Це дозволяє в подальшому досить легко видалити їх з вихідної води з використанням механічних методів [7].

Фізико-хімічні методи очищення включають в себе декілька найбільш типових і поширених методів, наприклад: коагуляцію та флокуляцію, адсорбцію та іонний обмін. Зазвичай, комбінація декількох методів виявляється найбільш ефективною, крім того, фізико-хімічні методи можуть бути досить вдало поєднані з біологічними методами очищення.

*Коагуляція* на сьогоднішній день розглядається як найбільш поширений традиційний підхід у питаннях технологій очищення, а саме як первинний або вторинний етап. Даний метод може застосовуватись як традиційно, так і з певними модифікаціями, наприклад, електрокоагуляція. *Флокуляція*, у свою чергу, є невід'ємною частиною процесу коагуляції в цілому. Коагуляція – це процес видалення забруднюючих речовин шляхом нейтралізації заряджених колоїдних частинок. Тобто відбувається злипання колоїдів (частинок) між собою у розчині за рахунок додавання певних хімічних речовин, які найчастіше являються солями неорганічного походження (коагулянтами). У свою чергу, флокуляція, що являється суто фізичним процесом, забезпечує контакт одна з одною нейтралізованих частинок або домішок, внаслідок чого відбувається агломерація

згустків. Такі новоутворені агломерати значно важчі за воду, тому осідають і легко відокремлюються від води.

*Адсорбція* – досить важливий етап очищення та підготовки води. Це процес концентрування одного або декількох компонентів газової або рідкої суміші на поверхні адсорбуючого матеріалу. При застосуванні даного методу очищення стічних вод важливими критеріями є параметри адсорбуючого матеріалу, які підбираються відповідно до природи забруднюючої речовини. Адсорбентами зазвичай виступають неорганічні оксиди, активоване вугілля (найбільш поширений і доступний прийом), цеоліти та різноманітні полімери. При цьому, чим більша площа поверхні адсорбенту та більш спорідненою є поверхня, тим ефективнішим буде видалення забруднюючої речовини з води. Раціональним є використання високоселективних щодо забруднювачів адсорбентів.

*Іонний обмін* в процесах очищення промислових стічних вод використовується для видалення органічних або неорганічних іонізованих молекул забруднювача з водного розчину. На практиці для іонного обміну використовують синтетичні іонообмінні матеріали (часто пористі смоли), основа яких гідрофобна, а на пористій гідрофільній частині зафіксовані аніонні або катіонні групи, або обидві групи одночасно. Наприклад, катіони у воді будуть видалятися катіонітними смолами, аніони – аніонообмінними. Взагалі, даний метод використовується у промисловості для ефективного видалення іонів у якості третинного етапу очищення. У процесі іонного обміну використовують синтетичні іонообмінні матеріали (часто пористі смоли) [8].

**Механічні методи очищення води** застосовуються як первинний етап очищення і допомагають попередньо підготувати воду до наступних етапів, видаляючи до 60 % грубодисперсних забрудників [9,10]. При механічному очищенні використовують різне обладнання, наприклад, решітки, піскоуловлювачі або гідроциклони, відстійники. Решітки використовують, зазвичай, першими у технологічній схемі. Вони дозволяють видаляти найбільші крупнодисперсні частинки. Робота піскоуловлювачів та гідроциклонів спрямована на видалення

піску та різних мінеральних речовин, а у відстійниках відбувається доочищення – видаляються мул, жири, смоли та інші залишкові домішки.

**Біологічні методи очищення води** на сьогоднішній день найбільш використовувані, оскільки мають досить високу ефективність. Біологічне очищення стічних вод забезпечується здатністю мікроорганізмів окиснювати органічні речовини, перетворюючи залишкові забруднювачі після механічного очищення на мінералізовані домішки. Для цього використовуються фільтраційні поля, поля зрошування та різного типу біологічні ставки. Після біологічного очищення воду доочищують та знезаражують [11].

### **1.3 Інноваційні методи, розробки та перспективи в сфері очищення промислових стічних вод**

Основна мета розробки інноваційних методів очищення стічних вод полягає у тому, щоб досягти кращих показників очищеної води й робити це більш економічно ефективно. Основною проблемою вважається щорічне збільшення кількості мулових відкладень та осадів на утилізації після первинних і вторинних методів очищення промислових стічних вод. Джерел забруднення стає все більше, потужності виробництв та використовуваної води теж зростають.

Основними механізмами біологічного очищення промислових стічних вод є перебіг аеробних та анаеробних процесів з використанням мікроорганізмів. *Аеробні процеси* зазвичай відбуваються за участі мікроорганізмів та наявності кисню, *анаеробні процеси* – відповідно без доступу кисню та з використанням анаеробних мікроорганізмів.

В процесі *аеробного очищення стічних вод* органічні забруднювачі виступають як джерело енергії для мікроорганізмів, які розкладають їх до води, вуглекислого газу та біомаси. Найчастіше застосовують такі мікроорганізми як *Pseudomonas* для очищення від нафтопродуктів, *Bacillus* для очищення від фенолвмісних забрудників, *Nitrosomonas* та *Nitrobacter* ефективні для денітрифікації.

*Аеробні процеси* можна охарактеризувати рівнянням (1.1):



*Анаеробний процес* характеризується застосуванням анаеробних мікроорганізмів, що в процесі так само розкладають органічні речовини, але без доступу кисню, а в процесі їх метаболізму, крім вуглекислого газу і біомаси, утворюється ще й метан. Найбільш поширеними мікроорганізмами, що окиснюють органічні забруднення до метану, є *Methanosaeta* та *Methanosarcina* [12].

*Анаеробний процес* описується рівнянням (1.2):



Однак, біологічне очищення з використанням активного мулу на сьогоднішній день втрачає свою популярність через низьку ефективність, високу вартість, появу нових викликів і проблем у сучасному світі, які потребують розвитку та вдосконалення нових революційних технологій водоочищення. На противагу традиційним застарілим з'являються нові цікаві підходи до очищення стічних вод з використанням мікроорганізмів [13].

Однією з перспективних технологій біологічного методу очищення промислових стічних вод є використання *вдосконаленої технології мембранних біореакторів* (МБР). Мембранні біореактори передбачають застосування мембран або так званих носіїв з розташованими на них аеробними та анаеробними мікроорганізмами, які рухаються з водою, і забезпечують мікрофільтрацію та ультрафільтрацію для розділення осаду, отриманого після біологічного очищення. Дана технологія, по суті, може використовуватись замість етапу гравітаційного відстоювання і перспективна для повторного використання стічних вод. Крім того, показник біохімічного споживання кисню (БСК) стічних вод після МБР набагато кращий, а розділення осаду більш ефективне [14]. Однак, одним із основних недоліків даної технології вважається забруднення самої мембрани зваженими частинками та клітинними залишками, що значно знижує проникність мембрани і призводить до частої потреби в її заміні. Це підвищує витрати на експлуатацію, електроенергію, тощо [15]. Стосовно видалення фосфору, азоту та органічних речовин існує ще одна інноваційна технологія водоочищення – *застосування*

*аеробного гранульованого осаду (АГС)*. Складається АГС з консорціуму аеробних, анаеробних і факультативних типів мікроорганізмів у вигляді гранул, які, окиснюючи органічні речовини, за рахунок форми швидко осідають і забезпечують легке відокремлення очищеної води від загальної біомаси [16].

Відбуваються дані процеси у спеціальних реакторах послідовної дії, які мають відносно невеликий розмір і визначений цикл роботи – від 3 до 6 годин. Порівняно з традиційним методом очищення стічних вод з використанням активного мулу технологія АГС демонструє кращу ефективність та менші витрати на енергоспоживання, потребує меншої площі для забезпечення водоочищення [17].

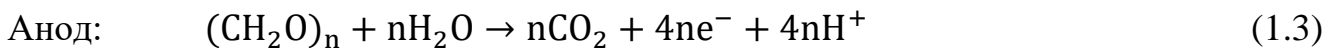
*Фіторемедіація* – ще одна новітня технологія очищення стічних вод за допомогою рослинності та мікроорганізмів. Дешевизна та екологічність даної технології роблять її все більш привабливою для інтеграції на підприємствах. Найчастіше для фіторемедіації застосовують водяний гіацинт, ряску, мікроводорості та інші гідрофіти [18]. Наприклад, використання водяного гіацинта завдяки його здатності до фітоекстракції та фітодеградації, створенню сприятливих для аеробних мікроорганізмів умов показує високу ефективність очищення від таких важких металів, як свинець, ртуть, а також інших високотоксичних сполук [19]. Окрім того, високу ефективність показують й інші вільноплаваючі види рослин, що застосовуються в процесах фіторемедіації, наприклад, *Azolla pinnata*, *Spirodela polyrhiza*, *Pistia stratiotes*, *Salvinia molesta*. Зазначені види рослин найбільш придатні для застосування у даних процесах водоочищення [20].

*Біоелектрохімічні системи (БЕС)* – технологія, яка демонструє значний потенціал серед новітніх технологій водоочищення і провокує появу таких нових технологій, як мікробний електросинтез (МЕС), біоелектрофентон (БЕФ), мікробні вуглецеві елементи (МВЕ) та мікробні паливні елементи (МПЕ), що засновані на здатності мікроорганізмів до електрохімічних реакцій для ефективного видалення забруднень з води, відновлення електроенергії та біоресурсів для виробництва, забезпечення поглинання вуглекислого газу. Тобто, варіативність БЕС вражає [21].



## 1.4 Біологічне очищення стічних вод з використанням мікробних паливних елементів

Мікробні паливні елементи (МПЕ) – новітня технологія, що застосовується в галузі водоочищення і базується на здатності певних штамів електроактивних мікроорганізмів перетворювати органічні та інші забруднюючі речовини з одночасним генеруванням електроенергії. Тобто, принцип роботи полягає у використанні анодного відсіку, який містить електрогенні мікроорганізми, і катодного – абіотичного, які розділені протоніообмінною мембраною [22]. Органічні речовини та інші токсичні сполуки окиснюються мікроорганізмами, генеруючи електрони та протони на аноді, які в подальшому передаються через ланцюг до катода. Передача протонів через мембрану необхідна для досягнення нейтральності зарядів завдяки градієнтному потенціалу протонів, що в кінцевому підсумку забезпечує генерацію енергії. Протони проходять через протоніообмінну мембрану (ПЕМ) до катодної камери, де електрони, протони та акцептори електронів (переважно кисень) об'єднуються з утворенням води. Однак, якщо кисень відсутній, то виробляється вуглекислий газ. Нижче наведені реакції, що відбуваються на аноді та катоді:



Дана технологія набуває все більшої популярності завдяки своїй високій ефективності очищення, низькій вартості та значно меншій кількості утвореного мулу в порівнянні зі стандартними методами та технологіями, а також через меншу кількість викидів парникових газів попри те, що генерується електроенергія [23]. Особливу роль МПЕ відіграє при очищенні промислових стічних вод від таких токсичних речовин, як важкі метали (наприклад, Cr (VI), що найчастіше зустрічається у стічних водах підприємств з виробництва натуральної шкіри). Дана технологія дозволяє при очищенні відновити сполуки Cr (VI) до менш токсичних форм [24]. Використання технології МПЕ має багато переваг серед інших технологій водоочищення і забезпечує стратегію екологічного сталого розвитку,

тим не менш, практична реалізація даної технології залишається не до кінця розкритою через низьку вихідну потужність [25].

Таким чином, одним із сучасних підходів до водоочищення є використання біологічного очищення промислових стоків. Проте, і такі технології мають не лише переваги, а й недоліки (табл. 1.1), що потребує подальшого їх удосконалення.

Таблиця 1.1 Переваги та недоліки технологій біологічного очищення

Технологія	Переваги	Недоліки
Використання аеробних процесів	Висока ефективність розкладу органічних речовин; зменшення БСК; простота застосування.	Високе енергоспоживання для подачі кисню; утворення великої кількості мулу; залежність від аерації.
Використання анаеробних процесів	Генерація метану як побічного продукту, або можливість використання його як біопалива; менша кількість утвореного мулу.	Повільніший процес очищення, необхідність контролю умов без кисню, можливе утворення токсичних речовин.
Використання аеробного гранульованого осаду (АГС)	Висока швидкість осідання; менші витрати енергії; компактність; ефективне розділення біомаси.	Складність у налаштуванні реакторів; залежність від підтримання гранульованої структури.
Використання мембранних біореакторів (МБР)	Ефективність очищення; можливість повторного використання води.	Висока вартість мембран; забруднення мембрани; необхідність частих замін та високі експлуатаційні витрати.
ФітореMediaція	Екологічність; дешевизна; ефективне видалення важких металів та токсичних сполук.	Обмеження ефективності при високих концентраціях забрудників; потреба у великих площах для рослин.
Використання мікробних паливних елементів (МПЕ)	Генерація електроенергії; зменшення викидів парникових газів; низька кількість мулу.	Недостатня потужність, складність у масштабуванні та висока вартість обладнання спричинена браком знань та досліджень даного питання.

## **Висновки до розділу 1**

Промислові стічні води утворюються в процесі виробничої діяльності людини і характеризуються наявністю забруднюючих речовин, специфічних для кожної галузі промисловості залежно від технологічних процесів підприємства. Зазвичай, це великодисперсні домішки, такі як частинки сировини, пісок, земля, жири, волокна, СПАР, барвники, дубильні речовини, важкі метали та інші токсичні хімічні речовини, які чинять безпосередній різко негативний вплив на здоров'я людини та стан навколишнього середовища при потраплянні до водойм.

Загалом, попри стабільно задовільний показник ефективності традиційних методів та технологій біологічного очищення стічних вод, існує низка актуальних проблем з очищення промислових стоків. Саме тому популярності набувають інноваційні технології і методи біологічного очищення, які здатні забезпечити ефективне очищення води від забруднень.

За результатами аналізу наявної науково-технічної літератури сформовано уявлення про промислові стічні води, традиційні та більш сучасні підходи до водоочищення. Встановлено доцільність біологічного очищення стічних вод з використанням біоелектрохімічних систем у вигляді мікробних паливних елементів, що полягає у суттєвому зменшенні навантаження на екологію навколишнього середовища та генерації власної електроенергії. Разом з тим, певні недоліки технології водоочищення в присутності мікробних паливних елементів обумовлюють необхідність більш докладного вивчення цих систем з метою більш результативного їх використання.

## РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Нормативи очищення промислових стічних вод

В Україні існує декілька основних джерел регуляції екологічних стандартів та вимог до якості води: 1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»; 2. Водний кодекс України; 3. Державні санітарні правила і норми охорони поверхневих вод (ДСП 173-96); 4. Постанова Кабінету Міністрів України №1100 від 25 липня 2018 року «Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення».

Основні положення закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» встановлюють основні принципи та вимоги до очищення стічних вод до рівня, що буде забезпечувати відсутність негативного впливу на водні ресурси та навколишнє середовище в цілому, а також зобов'язує до встановлення гранично допустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин у промислових стічних водах, що скидаються [26].

Водний кодекс визначає основні правові вимоги до використання та охорони водних ресурсів, санкцій та інших видів відповідальності за їх порушення [27].

Документ «Державні санітарні правила і норми охорони поверхневих вод» (ДСП 173-96) регулює охорону поверхневих вод і встановлює гранично допустимі концентрації, які розробляються на основі аналізу та оцінювання впливу забруднюючих і сильно токсичних речовин на водні екосистеми та навколишнє середовище, а також здоров'я людини [28].

Постанова Кабінету Міністрів України №1100 від 25 липня 2018 року «Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення» – це нормативний акт, що регулює умови, за яких приймаються стічні води до систем водовідведення і, відповідно, вимоги до показників стічних вод підприємств [29].

Оскільки у забрудненій воді, особливо у промислових стічних водах одночасно існує багато забруднюючих речовин з різними концентраціями,

різного розміру та агрегатного стану, то максимально точна їх ідентифікація майже неможлива. В результаті цього проводять санітарно-хімічний аналіз за груповими та основними показниками, що дозволяє оцінити стан вихідної води.

Проведення даного аналізу стічних вод передбачає визначення таких основних показників води як: температура, рН, забарвлення, запах, смак, завислі речовини, перманганатна окиснюваність, біохімічне споживання кисню (БСК), хімічне споживання кисню (ХСК), сульфати, азот, фосфати, хлориди, поверхнево-активні речовини (ПАР), нафтопродукти, важкі метали та різні токсичні речовини, мікробне число, розчинений кисень та вміст певного типу бактерій у воді.

*Величина рН* – концентрація іонів водню, що впливає на біохімічне окиснення органічних речовин. Оптимальним є значення 7-8, що забезпечує ефективну роботу біологічних очисних споруд, а також розвиток мікроорганізмів.

*Забарвлення, запах і смак* – це група органолептичних показників, що напряму залежать від складу стічних вод. За запахом, забарвленням і смаком можна зробити висновки, що саме скидається до води, процеси, які відбуваються з водою в певний період, як, наприклад, бродіння в каналізаційних трубах тощо.

*Завислі речовини* – найважливіша характеристика, що показує кількість осадів, що утворюється в процесі очищення. Концентрація завислих речовин у воді дозволяє визначити необхідний ступінь очищення і є основним нормативом.

*Хімічне споживання кисню ХСК* – це потреба води у хімічному окисненні органічних речовин до неорганічних. Показник відображає кількість окиснювача, яка споживається, коли для обробки води використовується сильний окисник. Чим більша хімічне споживання кисню, тим сильніше органічне забруднення.

*Біохімічне споживання кисню БСК* – потреба кисню в газі, що виражає масову концентрацію розчиненого кисню, необхідну для біохімічного процесу мікробного розкладу органічної речовини в аеробних умовах.

Вміст азоту і фосфатів теж досить важливий показник, від якого залежить швидкість біологічного очищення води, або можливість процесу в цілому.

Хлориди та сульфати, важкі метали, такі як залізо, нікель, мідь, свинець, цинк та інші токсичні елементи теж входять до складу стічних вод та їх концентрація максимально контролюється через різко негативний вплив на водну екосистему та всі живі організми [30].

*Органічні забруднювачі* включають гербіциди та пестициди, фармацевтичні препарати, паливо (наприклад, розливи нафти), промислові розчинники та миючі засоби, а також синтетичні гормони, пов'язані з фармацевтичними препаратами. *Неорганічні забруднювачі* включають такі поживні речовини, як нітрат та фосфат, важкі метали, хлорид та радіоактивні ізотопи, що виділяються в результаті гірничих робіт або ядерних аварій (таких як цезій, йод, уран, радоновий газ) [31].

Для мінімізації негативного впливу забруднюючих речовин на водойми при скиді при очищенні звертають особливу увагу на показники ГДК, значення яких наведені у табл. 2.1. Контроль даних показників один із важливих етапів, що проводиться перед очищенням стічних вод.

Таблиця 2.1 Вимоги до складу та властивостей стічних вод, що скидаються до системи централізованого водовідведення, для безпечного їх відведення та очищення на очисних спорудах системи централізованого водовідведення [32]

П/ч	Показник якості стічних вод	Одиниця виміру	Максимально допустиме значення показника та (або) концентрація в пробі стічних вод
1	2	3	4
1	Реакція середовища (рН)	од.	6,5-9,0
2	Температура	°С	+40

Продовження Табл. 2.1

1	2	3	4
3	БСК <sub>повне</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	згідно з проєктом очисних споруд або не більше 350,0
4	ХСК	мг/дм <sup>3</sup>	500,0
5	Співвідношення ХСК:БСК	-	менше 2,5
6	Завислі речовини	мг/дм <sup>3</sup>	300,0
7	Азот	мг/дм <sup>3</sup>	50,0
8	Фосфор загальний (P <sub>заг</sub> )	мг/дм <sup>3</sup>	5,0
9	Нафта та нафтопродукти	мг/дм <sup>3</sup>	10,0
10	Жири рослинні та тваринні	мг/дм <sup>3</sup>	50,0
11	Хлориди (Cl <sup>-</sup> )	мг/дм <sup>3</sup>	350,0
12	Сульфати (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	мг/дм <sup>3</sup>	400,0
13	Сульфіди	мг/дм <sup>3</sup>	1,5
14	СПАР аніонні	мг/дм <sup>3</sup>	10,0
15	Феноли	мг/дм <sup>3</sup>	0,25
16	Залізо (Fe)	мг/дм <sup>3</sup>	3,0

## 2.2 Вибір і характеристика мікробних паливних елементів

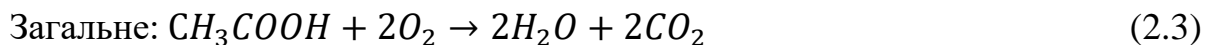
Сьогодні використання мікробних паливних елементів чудова альтернатива для утилізації органічних відходів або очищення стічних вод. Технологія універсальна і має багато перспектив для розвитку в майбутньому.

Мікробні паливні елементи – це біоелектрохімічні системи, що забезпечують очищення стічних вод шляхом використання мікробного метаболізму електрогенних бактерій для розкладання органічних речовин з одночасною можливістю генерації електричної енергії.

Загалом мікробний паливний елемент являє собою анодний та катодний електроди, розділені протонобмінною мембраною. Анод містить електрохімічно активні мікроорганізми, а катод являє собою абіотичне середовище.

Електрогенний мікроорганізм у даному випадку виступає біокаталізатором, що запускає активну деградацію органічного забруднювача та генерує електрони, які у подальшому проходять через зовнішній контур і надходять на катод. Далі іони водню рухаються до катода, де утворюють чисту воду у внутрішньому контурі системи.

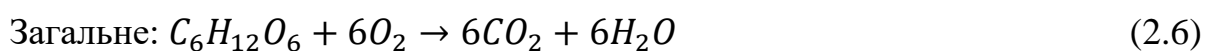
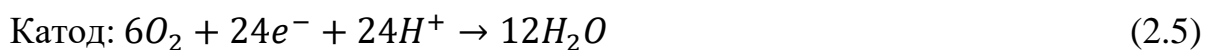
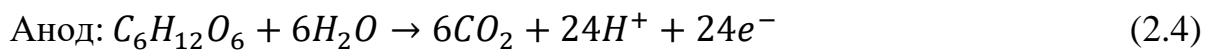
Таким чином, при використанні як субстрату, наприклад, ацетатної кислоти, отримуємо такі рівняння, що можуть охарактеризувати механізм роботи мікробних паливних елементів.



Реакції, зазвичай, будуть залежати від субстрату, який використовується, а також від типу електрохімічного мікроорганізму, але реальні мікробні паливні елементи можуть працювати з різними органічними речовинами, такими як вуглеводи, спирти, жирні кислоти тощо.

Конкретні реакції будуть змінювати залежно від типу забруднювача та мікроорганізму, матеріалу мембрани і багато іншого [33].

Ось, наприклад, рівняння реакції, якщо в якості субстрату взяти глюкозу:



Промислові стічні води, використані в якості субстрату для живлення МПЕ в промислових масштабах, показують себе найкраще. Значення показника ХСК – до 60-90 %, видалення таких важких металів як хром, кадмій – 90-99 %. При очищенні стічних вод з використанням МПЕ немає потреби використовувати



додаткові типи субстратів, хіба що в лабораторії, для кращого вивчення роботи механізму [34].

### **2.2.1 Конфігурації МПЕ, особливості вибору матеріалів і компоновання системи**

Мікробні паливні елементи на сьогоднішній день досліджуються в різних конфігураціях. За структурою основними є два типи конфігурації МПЕ: однокамерна та двокамерна.

*Однокамерна конфігурація мікробного паливного елемента* простіша і складається з анодної камери і катоду у відкритому просторі, де кисень не потрібно додатково генерувати, тому що він вже присутній у конфігурації. Мембрана також присутня, вона виконує протонообмінну функцію. Але дана конфігурація, хоч і має низку таких переваг, як простота та доступність, для промислових масштабів неприйнятна через розміри камери, тому що при збільшенні її розмірів з'являються обмеження в продуктивності системи. Наприклад, через відсутність окремого катодного відсіку відбувається змішування продуктів реакцій, що знижує ефективність роботи елемента. Також, однокамерна конфігурація обмежує кількість мікроорганізмів, та призводить до швидкого зносу катоду.

Натомість, *двокамерний мікробний паливний елемент* (рис. 2.1) – дуже перспективна конфігурація. Він складається з двох камер – анодної і катодної, розділених такою ж мембраною, проте, має більшу площу для реалізації механізму очищення та й взагалі більше можливостей для компоновання різних конфігурацій даної біоелектрохімічної системи. Такий тип МПЕ більш поширений та має перевагу для промислового застосування. Двокамерні МПЕ бувають різних типів за формою: наприклад, трубчасті або циліндричні, плоскі та пластинчасті, а також H-подібні.

*Стекові, або з'єднані мікробні паливні елементи* – ще одна конфігурація, яка сьогодні активно досліджується.

Принцип полягає в послідовному або паралельному з'єднанні декількох модулів мікробного паливного елемента, що дозволяє підвищити вихідну потужність електроенергії та ефективність видалення забруднюючих речовин з промислових стічних вод. Таке послідовне з'єднання забезпечує збільшення напруги та часу очищення, тоді як паралельне дозволяє збільшити тільки вихідний струм та щільність потужності.

Виділяють ще *конфігурації з горизонтальним та вертикальним з'єднанням*, але поки що є інформація лише про неспівставність їх вартості та ефективності.

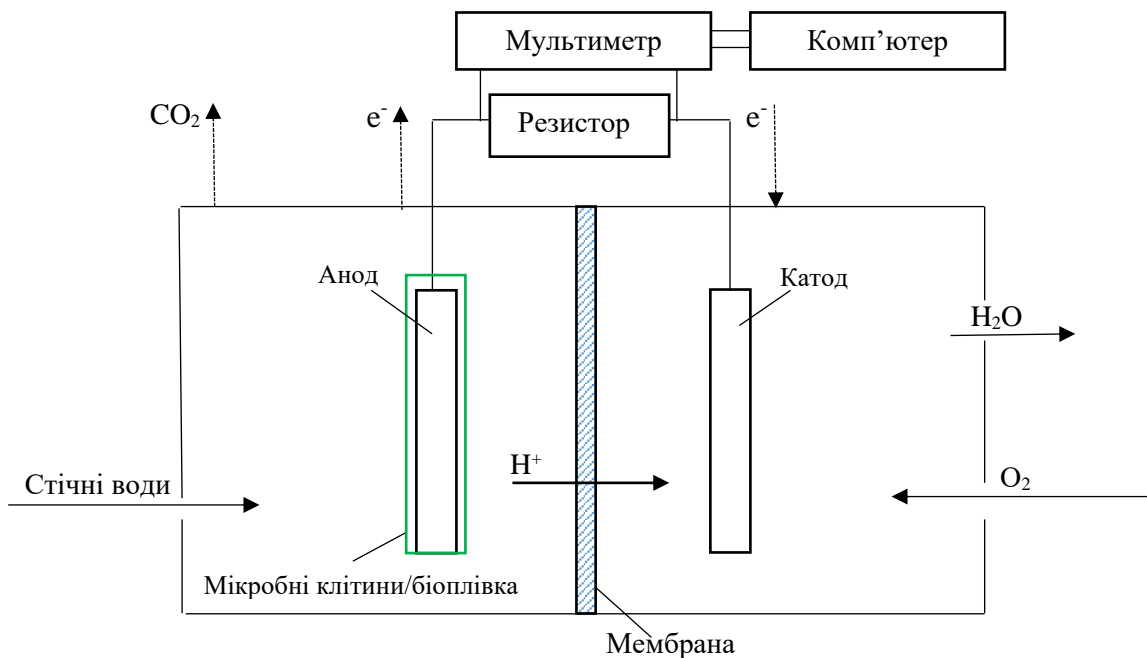


Рис. 2.1. Схематичне зображення типового двокамерного мікробного паливного елемента [35].

Крім наявних структурних конфігурацій МПЕ, існує можливість експериментувати з матеріалами мембран, типами анодів та катодів, а також мікроорганізмів, що будуть застосовуватись в системі.

На аноді у даній біоелектрохімічній системі відбувається окиснення забруднюючих речовин мікроорганізмами. Вибір матеріалу для анода є дуже важливим етапом, оскільки має безпосередній вплив на продуктивність системи та швидкість проходження реакції. Отже, для формування стабільної та

ефективної біоплівки на аноді потрібен біосумісний з електрогенними бактеріями матеріал, який буде реально контролювати адгезію бактерій до поверхні самого анода. Крім того, шорсткість поверхні анодного матеріалу також має бути підвищена для забезпечення успішного прикріплення бактерій.

Широко поширеними матеріалами для анодів на сьогоднішній день виступають вуглецеві матеріали. Крім того, деякі метали та оксиди металів також успішно застосовуються в різних модифікаціях.

Найбільш поширеним матеріалом є карбон завдяки хорошій біосумісності, термічній стабільності та відносно невисокій вартості. Високий показник співвідношення площі поверхні до об'єму і шорстка поверхня вугільних анодів забезпечують більше місце та більш сприятливі умови для росту бактерій.

Найпоширенішими матеріалами на основі карбону вважаються вуглецевий папір, графітові пластини та електроди (однак, останні дуже дорогі для великих масштабів застосування), вуглецеві сітки, карбонова повсть, гранульований графіт та інші види вуглецевого полотна і матеріалів.

Такий одношаровий кристалічний матеріал як графен має високу електропровідність та велику площу поверхні, що забезпечує гарну біосумісність та вищу рухливість електронів. Це робить його вдалим матеріалом для застосування серед інших матеріалів на основі карбону.

Такі струмопровідні полімери як поліпірол, поліанілін та інші також мають задовільні показники провідності та адгезії мікробіому, однак, серед провідних проблем даного типу матеріалу для анода є накопичення протонів у біоплівці.

Порівняно з карбоновими анодами металеві та металоокисні аноди не набувають такого широкого застосування для МПЕ, не дивлячись навіть на те, що мають відносно вищу електропровідність за інші типи матеріалів. Уданому випадку важливу роль відіграє значна кількість параметрів і характеристик, особливо корозійна активність металу. Серед металів, які виступають матеріалами для анода, найчастіше зустрічається платина, титан, нержавіюча сталь, хоча перші типи матеріалів мають досить високу вартість, а останній тип (нержавіюча сталь) не забезпечує достатнє прикріплення мікроорганізмів.

Благородні метали теж показують досить високу ефективність у якості матеріалу для анода, хоча такий анод вважається дороговартісним, але, як показують дослідження, може виступати навіть як каталізатор.

Не менш важливим етапом також є вибір катоду, на них припадає майже 50 % вартості всієї системи. Це напряму впливає на продуктивність системи, густину потужності та загальні електрохімічні характеристики. Основними типами катодів є повітряні та водно-повітряні катода з каталізаторами або без них. Повітряний катод контактує безпосередньо з повітрям, не потребує додаткової аерації і має досить просту структуру. Водно-повітряний катод занурений у розчин електроліту, що містить розчинений кисень, який виступає акцептором електронів, але ефективність такого типу обмежена параметром розчинності кисню в електроліті.

Найпоширенішими матеріалами для катода є карбонова тканина, папір, платинова сітка. Важливу роль відіграють і зв'язуючі речовини, до яких теж існують певні вимоги. Такі зв'язуючі речовини забезпечують стабільність катодного шару, хорошу електропровідність і адгезію між основою матеріалу катоду і каталізатором, який пришвидшує реакцію передачі електронів. Тому існує потреба в проведенні досліджень з метою отримання нових зв'язуючих матеріалів, придатних для застосування з точки зору вартості та ефективності.

У роботі [36] наведена інформація про біокатода. Даний тип катоду використовує аеробні бактерії, може самостійно біохімічно каталізувати проходження реакції та підвищувати загальну продуктивність МПЕ. Для формування такого катоду потрібна основа, на якій мікроорганізми та бактерії будуть утворювати плівку. Ефективність таких катодів більша за абіотичні, але є ряд таких недоліків, як високі коливання рН та необхідність підвищеного контролю даного показника, а також нижча вихідна потужність струму. Для формування біокатодів часто використовують нержавіючу сталь. Матеріали на основі вуглецю, такі як графітова повсть, активоване вугілля, гранульований графіт тощо, також використовуються для формування біокатодів

Матеріал мембрани також відіграє важливу роль при формуванні та розробці МПЕ, оскільки впливає на довговічність системи. Однак, основними проблемами з вибором та інтеграцією мембран є їхня вартість, часте забруднення, потреба в заміні, а також показник внутрішнього опору. Проводяться дослідження з визначення оптимальних параметрів мембрани [37, 38,39], при цьому найбільш визначальними з них вважаються вартість мембран, їх стійкість до забруднення, внутрішній опір, селективність та стабільність як хімічна, так і механічна.

*Катіонообмінна мембрана* транспортує протони і містить фіксовані негативні заряди. Це найбільш поширений тип мембрани, яка має гарні показники ефективності.

*Аніонообмінна мембрана* – ще один тип, який дозволяє транспортувати негативно заряджені іони і містить фіксовані позитивно заряджені іони. Дозволяє отримати більший вихідний струм, зменшує опір на катоді, але провідність аніонів все одно нижча за катіонообмінну.

*Біполярна мембрана* складається з двох монополярних мембран – аніонообмінної та катіонообмінної. Такий тип мембран ефективно транспортує два різних види іонів (як аніони, так і протони) через водороздільну поверхню, однак, найбільшою проблемою виявляється високий градієнт рН.

*Пористі мембрани* – дешева альтернатива традиційним мембранам, які застосовуються для МПЕ. Найчастіше використовується ультрафільтраційна мембрана або звичайне скловолокно. Оскільки розміри пор мембрани можуть варіюватись залежно від розмірів іона, який вона має пропустити, такий тип мембрани для МПЕ має суттєвий недолік – загалом через них можуть проникати інші молекули, наприклад, більші за протони чи аніони. Пористі мембрани в цілому мають незначну перевагу в зниженні внутрішнього опору [40].

### **2.2.2 Характеристика мікроорганізмів для створення МПЕ**

Для біологічного очищення промислових стічних вод з використанням мікробних паливних елементів використовуються мікроорганізми, що здатні

генерувати електрони в процесі метаболічного перетравлення органічних речовин. Такими мікроорганізмами найчастіше є бактерії, що входять до групи електроактивних. Більшість електрогенних бактерій є анаеробами, тобто працюють без доступу кисню.

Рід *Geobacter* один із найпоширеніших родів електрогенних бактерій. Він особливо ефективний при очищенні вод, що містять важкі метали (наприклад, хром), оскільки може відновлювати їх. Бактерія *Geobacter sulfurreducens* здатна передавати електрони, окиснюючи органічні речовини у стічній воді. Відомо, що цей рід здатний зберігати енергію для підтримки росту шляхом повного окиснення органічних сполук до вуглекислого газу з електродом, який може бути єдиним акцептором в системі.

Рід *Geobacter* є досить цікавим та яскравим прикладом мікроорганізмів, які, з одного боку, є досить поширеним родом у навколишньому середовищі, а з іншого – важлива ланка в проходженні біогеохімічних процесів. *Geobacter* досить легко генетично модифікувати, експериментуючи з різноманітним властивостей, а також легко отримати, культивуючи у лабораторних умовах. Існує також дуже багато інших характеристик, що роблять даний рід зручним для досліджень. Окрім того, рід *Geobacter* або у чистому вигляді, або у складі мікробного консорціума, який містить цей рід бактерії, здатний до надання біоплівці чудових електропровідних властивостей. Це забезпечує оптимальну продуктивність мікробних паливних елементів та ефективність видалення забруднень з стічної води.

Здатність *Geobacter* до відновлення Fe (III) та частково Mn (IV) відіграє важливу роль у кругообігу вуглецю у водних відкладах, і позитивно впливає на геохімію водних середовищ через вивільнення Fe (II) і Mn (IV). Також *Geobacter* сприяє зменшенню вмісту U (VI) і радіонуклідів та деградації широкого спектру органічних забруднювачів. Отже, виробництво матеріалів на основі роду мікроорганізмів *Geobacter* з чудовими електронними властивостями є новою перспективною галуззю досліджень інженерних стратегій біоремедіації.

Також виявлено, що вид *Geobacter* використовує різноманітний ряд акцепторів електронів для підтримки анаеробного росту, а *G. Sulfurreducens* здатні до росту навіть за низького вмісту кисню [41].

Даний рід бактерій надає перевагу прісній воді, у той час як *Desulfuromonas* – морській, солоній воді. Також цей рід бактерій показує гарну ефективність видалення сірчистих сполук.

Якщо порівнювати *Geobacter* та *Shewanella* з іншими видами мікроорганізмів, то зазначені роди бактерій показують більшу життєздатність та продукують більше струму. *Shewanella* має цитохроми зовнішньої мембрани і здатна до прямого перенесення електронів, а *Geobacter*, крім цитохром зовнішньої мембрани, має ще й залізовмісні білки, що дозволяють з'єднувати бактеріальні клітини безпосередньо з електродом [42].

*Shewanella oneidensis* також є поширеною бактерією, що здатна окиснювати органічні речовини, утворювати та переносити електрони. Вона може працювати з різним акцепторами електронів, включаючи метали та нітрати, що робить її досить корисною для очищення промислових стічних вод, забруднених як органічними, так і неорганічними речовинами. Види *Shewanella* були першими організмами, які запропонували як засіб переносу електронів на поверхню електродів за допомогою білків-переносників електронів. Ці види гарно асимілюють продукти ферментації, є активно рухливими та факультативно анаеробними бактеріями. Часто зустрічаються у субоксидних відкладеннях.

У роботі [43] було порівняно густину струму та потужність декількох видів стічних вод (сільськогосподарських, побутових, харчової та паперової промисловості) з використанням трьох видів інокулянтів: ендогенними мікробами стічних вод (МПЕ1), *Shewanella oneidensis* MR-1(МПЕ2) та ендогенними мікробами стічних вод в поєднанні з MR-1 (МПЕ3) у мікробних паливних елементах однокамерної конфігурації. За результатами проведеного дослідження встановили наступні закономірності:

- для побутових та сільськогосподарських стічних вод вид *Shewanella* був найкращим і найбільш ефективним кандидатом, який забезпечив очищення та вихід максимально можливого показника струму;

- для стічних вод харчової та молочної промисловості максимальний струм на виході та показники очищення забезпечив МПЕЗ, що поєднав звичайні ендогенні бактерії у консорціуму з *Shewanella*.

Дослідження *Pseudomonas stutzeri* показали потенціал даного виду у якості біоремедіатора для відновлення свинцю, а також зменшення вмісту у воді міді приблизно на 85 %. Отже, даний вид мікроорганізму має здатність до відновлення деяких токсичних іонів, але його здатність до очищення та деградації токсичних іонів з одночасним ефективним виробництвом електричної енергії у конфігураціях МПЕ досі невідома.

У якості біокатализаторів в МПЕ досліджувались також деякі інші види мікроорганізмів, наприклад, *Cyanothece*, *Chlorella*, *Phormidium*, *Scenedesmus* [44], але інформація про ефективність очищення промислових стічних вод у разі їх використання, на жаль, відсутня.

Автори [45] зазначають те, що *Clostridium* можуть бути залучені до ферментаційних процесів і одночасно передавати електрони, тобто будуть корисні для очищення промислових стічних вод з високою концентрацією органічних сполук, особливо таких, як спирти, леткі жирні кислоти

Загальним терміном для позначення бактерій, пов'язаних з поверхнею, є *біоплівка*. Цілком ймовірно, що не всі організми, пов'язані з анодною біоплівкою, взаємодіють безпосередньо з анодом, а можуть взаємодіяти опосередковано через інших членів мікробного консорціуму. Наприклад, виявлено, що *Brevibacillus sp.* РТН1 є поширеним членом спільноти МПЕ, але виробництво енергії штамом *Brevibacillus sp.* РТН1 є низьким, якщо його не культивувати разом з *Pseudomonas sp.*

Чисті культури, що здатні продукувати струм у МПЕ, включають представників *Firmicutes* та *Acidobacteria*, чотири з п'яти класів *Proteobacteria*, а також штами дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* та *Hansenula anomala*. Ці



організми взаємодіють з анодом за допомогою різноманітних прямих і непрямих процесів і різною мірою генерують струм [46].

МПЕ пропонує прекрасне майбутнє для деградації забруднювачів стічних вод, переробки будь-якого типу відходів та одночасного виробництва відходів. Використання мікроорганізмів для МПЕ допоможе мінімізувати токсичність, підвищити можливість виробляти електроенергію без великих витрат на обладнання, що якнайкращим чином підтримає малі та великі промислові підприємства [47].

У дослідженні (Isilay Ulusoy et al., 2018) були використані окиснювальні бактерії *Thiobacillus ferrooxidans* на катоді та змішана культура бактерій на аноді МПЕ. Досліджувались різні значення рН для аноду та катоду.

Найкращий результат потенціалу електронного ланцюга (0,8 В) було отримано при рН 8 на аноді і рН 2 на катоді. Крім того, для анодного відсіку МПЕ використовували ацетат в якості субстрату. В умовах використання даного типу субстрату було отримано найстабільніші показники з високими значення потенціалу, що досягав 0,726 В, а густина потужності досягла 0,88 мВт/см<sup>2</sup>.

Загалом, види *Geobacter* spp., *Shewanella* spp., *Rhodoferrax ferrireducens*, *Aeromonas hydrophila*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Clostridium butyricum*, *Shewadella oneidensis MR-1*, *Rhodobacter sphaeroide* та *Enterococcus gallinarum* є одними з найпоширеніших мікроорганізмів для формування ефективного МПЕ [48].

## **2.3 Вибір і характеристика технологічної схеми промислового водоочищення**

### **2.3.1 Загальні технологічні схеми промислового водоочищення**

Індустріалізація за останні десятиліття досягнула значного розвитку та поширеності, що залишило помітний відбиток на екосистемах. У ході масової поширеності виробничої діяльності утворилась велика кількість відходів виробництва та забруднених стічних вод, що потрапляють у навколишнє середовище і чинять небезпеку для всього живого [49].

Важливим вирішенням проблеми захисту природних ресурсів є видалення небезпечних і високотоксичних сполук з промислових стічних вод, забезпечення можливості їх повторного використання.

Оскільки склад стічних вод суттєво різниться і залежить від галузі промислової діяльності, методи очищення та підходи для обробки води теж будуть відрізнятись, а вибір технології очищення завжди вимагатиме особливої уваги та відповідної методології. Методи очищення промислових стічних вод зазвичай поділяються на декілька категорій, і будуть залежати від характеристик вихідної води та особливого складу для певної галузі діяльності. Зазвичай виділяють хімічні, фізико-хімічні та біологічні методи [50].

Кожен метод очищення потребує відповідної технологічної схеми, що забезпечить ефективне видалення забруднюючих речовин залежно від того, куди на кінцевому етапі буде направлена вода.

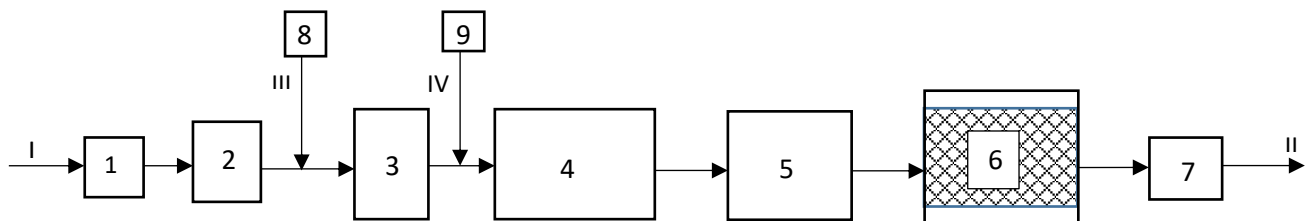


Рис. 2.2 Технологічна схема очищення з використанням механічних та фізико-хімічних методів: 1 – водозабірні споруди; 2 – решітки (піско-вловлювачі) гідроциклони; 3 – змішувач; 4 – відстійник; 5 – флотаційна установка; 6 – фільтри/механічні фільтри; 7 – знезаражувальні установки; 8 – додавання коагулянту; 9 – додавання флокулянту; I – забір води на станцію водоочищення; II – скид у водойму; III – подача коагулянту в змішувач; IV – подача флокулянту перед відстійником.

*Технологічна схема* – це компонування очисних споруд та обраних технологічних процесів у певній послідовності, що забезпечить ефективне видалення домішок та забруднюючих сполук до концентрацій, прийнятних для подальшого скидання до водойм.

*Механічне очищення* використовується для видалення з води механічних крупних домішок і забезпечується шляхом використання фільтрів, решіток, гравітаційного осадження або центрифугування. Спочатку відбувається так

зване попереднє очищення, що забезпечує видалення таких складових як ганчір'я, пісок, жир та інших крупнодисперсних домішок. Після цього за технологічною схемою застосовують методи первинного очищення, що передбачають *фізико-хімічне очищення* для видалення завислих речовин та органіки.

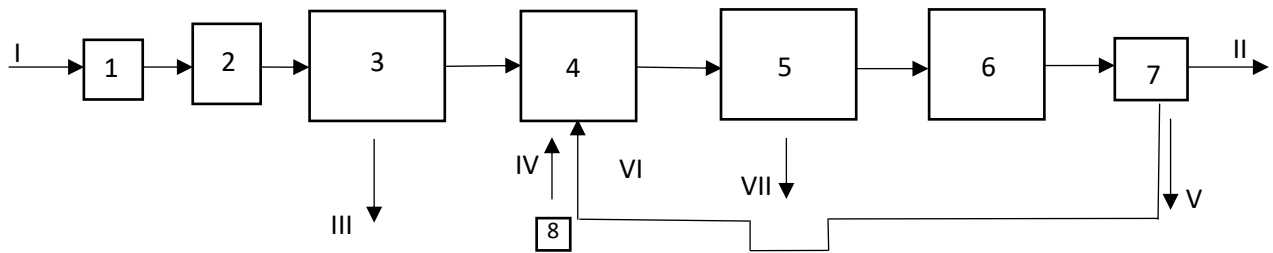


Рис. 2.3 Технологічна схема біологічного аеробного очищення: 1 – водозабірні споруди; 2 – решітки/пісковловлювачі; 3 – первинний відстійник; 4 – аератор; 5 – вторинний відстійник; 6 – аеротенк; 7 – регенератор; 8 – повітря; I – забір води на станцію водоочищення; II – скид у водойму; III, VII – відведення осаду з відстійника; IV – подача повітря до аератора; V – відведення осаду на утилізацію; VI – відведення регенованого осаду до аератора.

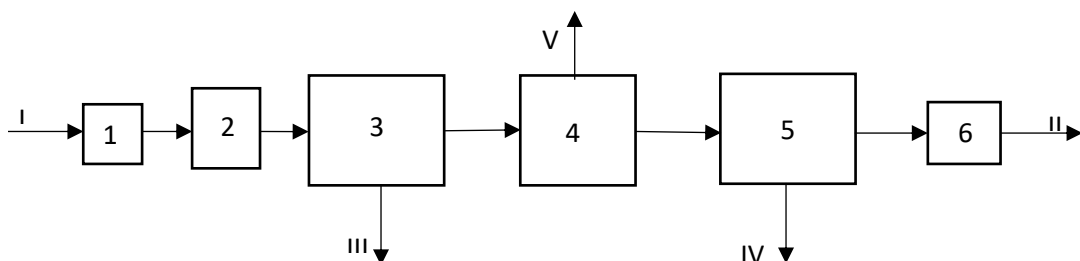


Рис. 2.4 Технологічна схема біологічного анаеробного очищення: 1 – водозабірні споруди; 2 – решітки/пісковловлювачі/гідроциклони; 3 – первинний відстійник; 4 – метантенк; 5 – вторинний відстійник; 6 – споруди доочищення; I – забір води на станцію водоочищення; II – скид у водойму; III, IV – відведення твердих забруднюючих частинок; V – збір або утилізація біогазу [52].

Така схема підійде для очищення стічної води з високою концентрацією завислих речовин, високою каламутністю і крупнодисперсними або високотоксичними домішками, які видаляються хімічними речовинами [51].

*Біологічне очищення* відбувається з використанням мікроорганізмів, які окиснюють органічні домішки у присутності кисню або без нього. Окиснення домішок у присутності кисню забезпечується активним мулом або біофільтрами різних типів, а без кисню, наприклад, у метантенках.

Для ефективного очищення промислових стічних вод, які містять багато різних забруднюючих речовин з різними концентраціями та рівнем токсичності, застосовуються також *комбіновані технологічні схеми очищення*, які поєднують в собі фізико-хімічні та біологічні методи в одній схемі.

### **2.3.2 Технологічна схема з інтегрованим мікробним паливним елементом**

Застосування мікробних паливних елементів у біологічному очищенні промислових стічних вод оптимізує схему біологічного очищення з мінімальними витратами та прикладеними зусиллями. Наприклад, у технологічну схему можна легко інтегрувати *мікробний паливний елемент двокамерної конфігурації*.

Для практичного застосування даної технології процес очищення повинен бути стабільним, без додаткових витрат енергії та будь-яких ресурсів на його обслуговування під час експлуатації. Очищення з використанням МПЕ має безліч переваг серед інших методів біотехнології. Однією з унікальних переваг є те, що МПЕ легко піддаються контролю у реальному часі, отже, можна легко контролювати надійність і стабільність процесу, і є багато можливостей вдосконалення.

В деяких дослідженнях [53,54] повідомляється про декілька успішних МПЕ з хорошими довгостроковими (до двох років) показниками очищення реальних промислових стоків. Разом з тим, існує ряд публікацій [55,56], у яких

повідомляється про погіршення продуктивності мікробних паливних елементів у разі довгострокової експлуатації.

Однак, цей факт пов'язаний з особливістю обслуговування МПЕ, що є достатньо відповідальним завданням. Недостатній контроль змін робочого середовища, зношення матеріалу електродів, їх корозія або забруднення та погіршення матеріалу мембран – всі ці фактори впливають на стабільність та ефективність очищення стічних вод. Тому ці фактори слід обов'язково враховувати при інтеграції мікробного паливного елемента в технологічну схему підприємства.

У даному дослідженні **пропонується технологічна схема сталого біологічного очищення стічних вод з інтегрованим мікробним паливним елементом і комбінованими інноваційними технологіями біологічного очищення** (рис. 2.5). Схему можна застосувати, наприклад, для очищення стічних вод аграрної або харчової промисловості, але для очищення високотоксичних стічних вод схема потребуватиме додатково фізико-хімічних методів та знезараження після ультрафільтрації.

Технологічна схема передбачає використання комбінованої технології, що забезпечує анаеробне очищення високонцентрованих вод у висхідних анаеробних мулових майданчиках та інтегрований мікробний паливний елемент, осадження струв'ітом, а також використання водоростей або мікроводоростей та кінцевого мембранного очищення.

Використання МПЕ забезпечить ефективне розкладання залишкових органічних речовин після анаеробного зброджування з одночасним відновленням енергії з потоку, а також виключення зі схеми аеробного очищення, що знизить вартість та кількість відходів у кінцевому результаті. А якщо передбачено очищення не дуже забруднених стічних вод, їх можна одразу направляти на МПЕ. **Якщо стічні води містять високі концентрації фосфатів, дана технологічна схема пропонує очищення стоків шляхом виробництва струв'іту  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  або інших фосфатвмісних осадів.**

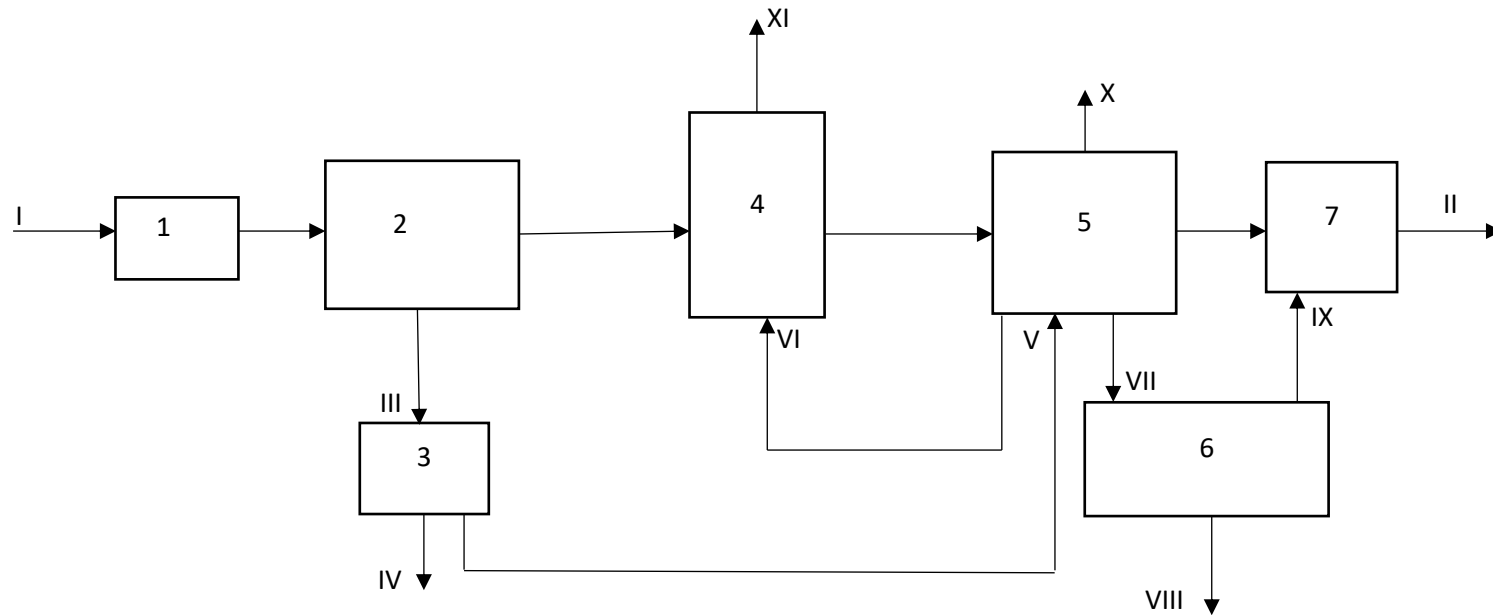


Рис. 2.5 Технологічна схема біологічного анаеробного очищення: 1 – установка комплексного механічного очищення; 2 – первинний відстійник; 3 – струвітний реактор; 4 – UASB реактор; 5 – мікробний паливний елемент; 6 – фітобіореактор/штучні водойми; 7 – ультрафільтраційна мембрана;

I – забір води на станцію водоочищення; II – скид у водойму; III – вода з високою концентрацією фосфатів на струвітне осадження; IV – продаж або утилізація мінерального добрива; V – вода з видаленими фосфатами на очищення в МПЕ; VI – надлишок біомаси; VII – вода на фітобіореактор з водоростями або ціанобактеріями; VIII – утворення біодизелю; IX – вода на доочищення на ультрафільтраційній мембрані; X – електроенергія; XI – біогаз [57].

**Якщо стічні води містять високі концентрації фосфатів**, дана технологічна схема пропонує очищення стоків шляхом виробництва *струвіту*  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  або інших фосфатвмісних осадів. Таким чином, створюється можливість одночасного відновлення магнію, фосфату та аміаку. У поєднанні з МПЕ це чудово працює і забезпечує ефективне очищення. Струвіт може зробити процес очищення більш економічно вигідним через відновлення дефіцитних і стратегічно цінних фосфатів, покращити вироблення електроенергії при подальшому очищенні на МПЕ, що забезпечить остаточне видалення органіки на етапі постобробки стічної води. Така комбінація забезпечує гарну **синергію** (тобто сумарний ефект) цих процесів.

На наступному етапі пропонується **обробка стічної води з використанням водоростей**, що забезпечить високу ефективність очищення у поєднанні з мікробними паливними елементами. Водорості та ціанобактерії – фотоавтотрофи і можуть поглинати поживні речовини з води для виробництва біомаси. Після зниження показника ХСК в очищуваній воді за допомогою МПЕ обробка водоростями додатково покращить якість води, що очищується.

Поглинання  $CO_2$  забезпечує такі енергетичні переваги як *отримання біодизелю*. Ефективність видалення вуглецю, азоту та фосфору у такій інтегрованій системі дорівнює 69,8-99,6 % зі стабільною потужністю 68 мВт.

На кінцевому етапі очищення за даною схемою рекомендується ще **глибоке очищення з достатнім видаленням планктону та інших зважених речовин**, які не піддаються очищенню з використанням мембранних технологій, шляхом послідовного або паралельного з'єднання ультрафільтраційної мембрани з попереднім етапом очищення на МПЕ.

У кінцевому підсумку дана схема була модернізована: було додано комплексну установку механічного очищення стічних вод, яка включає в себе всі етапи попереднього очищення. Такий підхід зробить дану технологічну схему універсальною для галузей промисловості.

При очищенні стічних вод важкої промисловості, з високою концентрацією токсичних іонів у воді, до наявної технологічної схеми

**можна додати споруди фізико-хімічного очищення, як попередній етап перед подачею води на відстійник. А також знезараження після ультрафільтрації та подальшу обробку осаду стічних вод важкої промисловості.** У якості обладнання для фізико-хімічного очищення можна застосувати змішувач, у який буде подаватись коагулянт, а далі, у потік перед надходженням води у відстійник, буде подаватись флокулянт. Це забезпечить повну мінімізацію можливості потрапляння великої концентрації іонів важких металів до мікроорганізмів.

І хоч мікробний паливний елемент здатний до очищення, наприклад, від іонів хрому, все рівно для забезпечення більшої ефективності методу бажане зменшення органічного і токсичного навантаження на систему.

Така технологічна схема забезпечить відхід від високовартісної утилізації мулу після очищення на аеротенках, а також знизить енергоємність інших попередніх процесів за рахунок генерації власної енергії, яку можна використовувати для забезпечення потреб обладнання, що працює від мережі.

Для першого механічного етапу очищення пропонується обрати комплексну комбіновану установку механічного очищення M-KOMBI від Esmil. Даний модуль забезпечить всі етапи попереднього механічного очищення, вилучення відходів, піску, жиру та замінить собою безліч інших установок. Така комплексна споруда підійде для попереднього очищення стічних вод підприємств середньої потужності [58].

У якості відстійника також пропонується обладнання від Esmil – радіальний мулоскреб ІРПО, який реалізує процес відстоювання води завдяки своєму функціональному комплексу обладнання [59].

Щодо виробництва струвіту або інших фосфатвмісних осадів, то даний етап скоріше додатковий, його не обов'язково інтегрувати в технологічну схему. На жаль, на сьогоднішній день в Україні або дуже обмежений доступ до такого обладнання як струвітний реактор, або наявний реактор для осадження фосфатів в промисловому масштабі. Проте, розглядаючи розроблену пропозицію, як технологію сталого зеленого розвитку підприємства, додатковий прибуток від її



впровадження та забезпечення ефективної взаємодії з використанням мікробного паливного елемента на наступному етапі – подібне обладнання можна замовити через міжнародних постачальників. Наприклад, Colsen B.V з Нідерландів пропонують технологію ANPHOS з використанням магнію для формування кристалів струвіту, який потім після осадження використовується як мінеральне добриво [60]. Або Perl System з Нідерландів та Німеччини від компанії Ostara. Дана система так само перетворює фосфор зі стічних вод на добриво з додаванням магнію. Дані запропоновані системи підтримують впровадження філософії кругової економіки, що дозволить повторно застосовувати фосфор [61]. Крім того, дане підприємство пропонує низку новітніх іонообмінних матеріалів для мембран, а також анодів та електрохімічних систем очищення води.

Встановлення та реалізацію реактора UASB (upflow anaerobic sludge blanket reactor – висхідного анаеробного реактора з муловим покривом) в Україні пропонує компанія MNC Group. Їх модулі можуть бути розроблені відповідно до запиту клієнта з урахуванням оптимального розділення мулу та біогазу [62].

Щодо використання мікробного паливного елемента, то тут придбання обладнання може бути ще складнішим. Для забезпечення ефективного очищення підійде двокамерна конфігурація мікробного паливного елемента, але, на жаль, на українському ринку готових МПЕ-систем немає. Однак, з адаптацією або імпортом обладнання та компонентів для МПЕ-системи можуть допомогти науково-дослідні інститути та лабораторії, що працюють над дослідженням МПЕ, а також співпраця з вітчизняними інжиніринговими компаніями. Щодо зарубіжних постачальників, то EcoVolt від Cambrian Innovation (США) [63], а також Fuel Cell Earth [64], Princeton Applied Research, [65], BES Research можуть постачати як компоненти та матеріали для розробки своєї системи МПЕ, так і готову розробку системи. До приклада, EcoVolt зарекомендувала себе на міжнародному ринку як промислова система очищення з використанням мікробних паливних елементів. GSD (China) Co., Ltd. також пропонує вже готові конфігурації МПЕ-модулів з можливістю аеробного або анаеробного очищення.

Для обох варіантів постачання технологічного обладнання – шляхом замовлення компонентів або готової системи – можна також розглянути можливість контакту з виробниками через міжнародні платформи для закупівель обладнання: LabX [66] та Science Exchange [67]. Тут можна замовити як нове, так і уживане обладнання.

Фітобіореактор – в цілому, це споруда, що проектується під окремі потреби і потужності підприємства, саме тому для реалізації даної системи можна звернутись до провідних інжинірингових компаній, що займаються проектуванням споруд з очищення стічних вод, наприклад, ЗІКО, Екософт та інші. Щодо міжнародних постачальників, то є можливості доставки в Україну від Ecosphere Technologies (США), які спеціалізуються на фітобіореакторах та різноманітних екологічних інженерних рішеннях для очищення води [68].

Основними постачальниками промислових систем ультрафільтрації є виробництва компаній Ecosoft та Dow Chemical, також існує можливість автоматизації системи на основі керуючого клапана Clack Corp. Для вибору системи за параметрами замовника для підприємства можна зв'язатись з компанією ЗІКО.

## **Висновки до розділу 2**

У другому розділі надано розгорнуту характеристику сучасних технологій очищення промислових стічних вод, а саме підходи до видалення шкідливих речовин з високим рівнем токсичності.

Наведено вимоги до очищення та якості промислових стоків, що охоплюють гранично допустимі концентрації ГДК забруднюючих речовин відповідно до Закону «Про охорону навколишнього природного середовища», Водного кодексу України та постанов Кабінету Міністрів. Дотримання вимог цих стандартів знижує ризики для водних ресурсів і здоров'я населення.

Описано фізико-хімічні, хімічні та біологічні методи очищення стічних вод, які обираються залежно від складу стоків. Значну увагу надано новітній біоелектрохімічній технології використання мікробних паливних елементів

(МПЕ). Останні є системами, що дозволяють перетворювати органічні забруднювачі в електроенергію завдяки метаболізму електрогенних бактерій. МПЕ складаються з анода, де мікроорганізми розкладають забруднювачі, виділяючи електрони, та катода, де відбувається реакція, що завершується утворенням води. В результаті, крім очищення води, система продукує електроенергію, що робить її перспективною для промислового застосування.

Різні конфігурації МПЕ (однокамерні, двокамерні, стекові) забезпечують гнучкість для промислового впровадження. Двокамерні МПЕ є найбільш ефективними, оскільки мають окремі анодну та катодну камери, що збільшує площу очищення та електрогенерації.

До електрогенних бактерій належать *Geobacter* та *Shewanella*, які можуть генерувати електрони під час метаболізму органічних забруднювачів. *Geobacter* особливо підходить для очищення стічних вод, що містять важкі метали, наприклад, хром, оскільки бактерія здатна відновлювати ці метали. *Shewanella* може працювати з різними акцепторами електронів, включаючи нітрати та метали, що підвищує ефективність очищення.

Розглянуто технологічні схеми промислового водоочищення, які поєднують механічні, фізико-хімічні та біологічні методи. Запропонована інтегрована схема очищення стічних вод із МПЕ складається з декількох етапів:

- механічне очищення;
- осадження струвіту для видалення фосфатів;
- біологічне очищення за допомогою водоростей та МПЕ; водорості поглинають вуглець і поживні речовини, сприяючи додатковому очищенню, а також можуть бути задіяні для виробництва біомаси;
- мембранне очищення, як завершальний етап, що забезпечує глибоку фільтрацію, видаляючи залишкові зважені частки.

Застосування такої інтегрованої технологічної схеми дозволяє досягти високих показників очищення (видалення до 99,6 % вуглецю, азоту та фосфору) при стабільному виході електроенергії.

## РОЗДІЛ 3 КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ

### 3.1 Методи контролю якості стічних вод на вміст у них забруднювачів

Основними показниками контролю якості стічних вод на вміст у них забруднюючих речовин є показники ХСК та БСК, вмісту завислих речовин, сполук неорганічного азоту та інших, наприклад, фосфатів [69].

**Визначення вмісту завислих речовин** у стічних водах здійснюється наступним чином. Спочатку паперові беззольні фільтри «біла стрічка» розміщують в бюксах з відкритими кришками у сушильній шафі та нагрівають до 105 °С протягом 2 годин, після висушування закривають кришками і охолоджують в ексікаторі, після чого зважують на аналітичних вагах. Для визначення завислих речовин відміряють об'єм ретельно перемішаної проби за допомогою циліндра, і після перенесення проби на попередньо підготовлений фільтр одержують осад, який промивають 70-80 мл дистильованої води. Фільтр з осадом висушують спочатку на повітрі, а потім розміщують в бюксі і з відкритою кришкою висушують 2 години при 105 °С. Далі бюкс закривають, осад охолоджують та зважують. Записують результати в грамах з точністю до третього або четвертого знаку після коми. Операції висушування, охолодження, зважування повторюються до досягнення постійної маси [69].

Вміст завислих речовин обчислювати за формулою (3.1):

$$X = \frac{m_3 - m_1 - m_2}{V} \cdot 1000, \text{ мг/дм}, \quad (3.1)$$

де  $m_1$  – маса висушеного паперового фільтра, мг;  $m_2$  – маса бюкса, мг;  $m_3$  – маса бюкса з фільтром та висушеним осадом, мг;  $V$  – об'єм проби для аналізу, см<sup>3</sup>.

Для визначення динаміки осідання завислих речовин пробу стічної води об'ємом 500 см<sup>3</sup> вносять в циліндр такої ж місткості і тричі перемішують за допомогою кругових рухів. Далі циліндр ставлять на рівну поверхню столу, вмикають секундомір і через кожні три хвилини визначають об'єм, який займає маса завислих речовин, що осіли, в см<sup>3</sup>. Відстоювання проводять протягом 30 хвилин, після чого записують остаточне значення об'єму і результат округлюють до цілих.

**Визначення окисності води.** Це умовна величина, що характеризує ступінь забруднення води переважно органічними речовинами, які легко окиснюються перманганатом або біхроматом калію, а також деякими іншими неорганічними домішками:  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  [69].

Для визначення *перманганатної окисності* у якості окисника використовують перманганат калію  $\text{KMnO}_4$  у кислому середовищі. Проте, він окиснює не всі домішки, і у випадку забруднення води промисловими стічними водами окисність не буде відповідати повному вмісту органічних речовин у воді; тому визначають *біхроматну окисність* за допомогою біхромату калію  $\text{KCrO}_4$ , яка характеризує загальний вміст органічних речовин у воді, навіть таких, що важко окиснюються. Дані показники дуже важливі для контролю якості води [69].

*Перманганатна окисність* визначається за методом Кубеля, принцип якого полягає в окисненні речовин, що присутні в пробі води 0,01 н розчином  $\text{KMnO}_4$  у сірчано-кислому середовищі при кип'ятінні. Але даний метод можна використати тільки для проб, окисність яких нижче  $100 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ .

*Біхроматна окисність води* (або хімічне споживання кисню ХСК) – це кількість кисню в мг чи г у складі сильних окисників, яка потрібна для окиснення органічних і деяких неорганічних речовин на одиницю об'єму води. Сильно забруднені води зазвичай розводять перед визначенням, щоб відсоток доданого біхромату на окиснення складав не більше 50 %. Для визначення біхроматної окисності відбирають  $20 \text{ см}^3$  проби і поміщають в конічну колбу для кип'ятіння, далі додають  $10 \text{ см}^3$  0,25 н розчину біхромату калію, 0,4 г сульфату срібла та скляні кульки. Після цього суміш перемішують і обережно приливають до неї концентровану сірчану кислоту об'ємом  $30 \text{ см}^3$ , після чого колбу з'єднують із зворотним холодильником зі шліфом і кип'ятять 2 години. Далі – охолоджують, від'єднують холодильник і доливають в колбу  $100 \text{ см}^3$  дистильованої води, після чого знову охолоджують дану суміш і додають 5 крапель розчину N – фенілантранілової кислоти і титрують залишок біхромату розчином солі Мора до тих пір, поки не зміниться забарвлення індикатора з червонувато-синього до

смагддово-зеленого. Паралельно проводять холостий дослд з 20 см<sup>3</sup> дистильованої води.

Біхроматну окисність (x) в мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> обчислюють за формулою (3.2):

$$x = \frac{(a-b)k \cdot 0,25 \cdot 8 \cdot 1000}{V} = \frac{(a-b)k \cdot 2000}{V}, \quad (3.2)$$

де a – об'єм розчину солі Мора, витраченої на титрування проби, см<sup>3</sup>; b – об'єм розчину солі Мора, витраченої на холостий дослд, см<sup>3</sup>; k – поправочний коефіцієнт для приведення концентрації розчину солі Мора до точно 0,25 н; V – об'єм проби, взятої для аналізу, см<sup>3</sup>; 8 – еквівалент кисню [69].

Для визначення вмісту нітритів беруть 50 см<sup>3</sup> (або менше) профільтрованої проби і додають 1 см<sup>3</sup> розчину сульфанілової кислоти і ретельно перемішують. Якщо проба з підвищеною каламутністю або забарвлена, то спочатку визначають її оптичну густину, яку потім віднімають від оптичної густини проби. Пробу колориметрують або порівнюють зі стандартними розчинами, які приготовлені в циліндрах Неслера, і через 40 хвилин після додавання розчину α-нафтиламінуза калібрувальною кривою знаходять вміст нітритів.

Вміст нітрит-іонів обчислюють в мг/дм<sup>3</sup> за формулою (3.3) або в мг-екв/дм<sup>3</sup> за формулою (3.4):

$$x = \frac{c \cdot 50}{V}; \quad (3.3)$$

$$y = \frac{c \cdot 50}{V \cdot 46} = \frac{c \cdot 1,087}{V}, \quad (3.4)$$

де c – концентрація нітрит-іонів, знайдена за калібрувальним графіком або за шкалою стандартів, мг/дм<sup>3</sup>; V – об'єм проби, взятої для визначення, см<sup>3</sup>; 50 – об'єм, до якого розведена проба, см<sup>3</sup>; 46 – еквівалент нітрит-іону [69].

**Визначення вмісту фосфору.** У стічних водах фосфор присутній у різних видах. Частину проби фільтрують через щільний мембранний фільтр, у фільтраті визначають вміст усіх розчинних форм фосфору, а іншу частину гомогенізують і знаходять загальний вміст фосфору. Методика визначення фосфору базується на взаємодії ортофосфат-іонів з молібдатом у кислому середовищі з утворенням гетерополікислоти жовтого кольору, який переходить в інтенсивний синій з

додаванням сурмяновиннокислого калію та аскорбінової кислоти. Цей синій колір дає можливість заміряти кількісний вміст фосфатів у пробі води. Дана методика є обов'язковою для державних органів контролю за довкіллям для моніторингу стану навколишнього середовища [69].

Оскільки при очищенні стічних вод з використанням мікробних паливних елементів на аноді утворюється біоплівка з мікроорганізмів, що розкладають забруднюючі речовини, цей біоценоз потрібно постійно контролювати і проводити моніторинг для забезпечення ефективності очищення. Для цього з різних горизонтів біоплівка відбирається піпеткою з широким отвором для мікроскопування. Далі відмічається кількість, стан і рухливість організмів, їх колір, форми сторонніх грибів і гідробіонтів що присутні в матеріалі.

**Біохімічне споживання кисню (БСК)** – основний показник ступеня забруднення стічних вод органічними речовинами. Показник БСК визначається після  $n$ -ної кількості днів інкубації до появи  $0,1 \text{ мг/дм}^3$  нітритів, а добові коливання даної величини залежать від вихідної концентрації розчиненого кисню. Проводиться визначення БСК за різницею між вмістом кисню до та після інкубації методом об'ємного йодометричного титрування.

БСК визначають шляхом розведення проби води або без розведення, наливаючи підготовлену воду у посудину, і встановлюють температуру  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  з подальшою аерацією. Наповнюють три кисневі склянки сифоном і кожену склянку ополіскують  $30 \text{ см}^3$  підготовленої проби, після чого наповнюють до країв таким чином, щоб не з'являлись пухирці. Заповнену кисневу склянку закривають корком, щоб не залишалось всередині пухирців повітря. В одній з трьох склянок одразу визначають кисень, інші дві поміщають в термостат при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  і зберігають в темноті  $n$  днів, після чого визначають в них вміст розчиненого кисню.

Визначають БСК за формулою (3.5) в  $\text{мгO}_2/\text{дм}^3$  нерозведених проб:

$$\text{БСК}_n = C_o(O_2) - C_n(O_2) \quad (3.5)$$

Для розведених проб БСК обчислюється за формулою (3.6) з урахуванням розведення  $R$  (об'єм проби в  $1 \text{ дм}^3$ ):

$$\text{БСК}_n \frac{C_o(O_2) - C_n(O_2)}{R}, \quad (3.6)$$

де  $R$  розведення, тобто об'єм проби в 1 дм<sup>3</sup> суміші проби води для розведення;  $n$  – дні інкубації;  $C_o(O_2)$  і  $C_n(O_2)$  – вміст кисню до та після  $n$  днів інкубації [70].

### 3.2 Приклади оцінювання ефективності біологічного очищення води з використанням МПЕ

Розглянемо декілька прикладів оцінювання ефективності біологічного очищення води з використанням мікробних паливних елементів.

**Приклад 1.** У дослідженні (Ghorab R.E.A. et al., 2022) використано реактор мікробного паливного елемента двокамерної конфігурації UMFC (upflow-MFC реактор) з висхідним потоком загальним об'ємом 950-1000 мл для очищення стічних вод після процесу дублення у сильно засоленому середовищі. Анод мав площу поверхні 180 см<sup>2</sup>, стічні води подавались в анодну область, а у катодну завантажувався фосфатний буфер з рН 7,2. Для розділення камер було використано протонно-обмінну мембрану Nafion на відстані 2 см.

Особлива увага у цьому дослідженні надавалась забезпеченню постійного гідравлічного часу утримання, тестуванню ефективності очищення та генерації енергії при різних рівнях органічного навантаження: 0,6; 1,2; 1,8 та 2,4 г/л відповідно. Такий підхід дозволив виявити оптимальне навантаження для найбільш ефективного видалення забруднень, особливо хрому.

Стічні води заводу шкіряної промисловості збирали у пластиковий контейнер об'ємом 10 л раз на тиждень і зберігали для подальших дослідів при температурі 4 °С. Забір проб відбувався протягом двох тижнів.

У якості мікроорганізмів для формування мікробного паливного елемента було обрано галофільний консорціум, представлений видами *Ochrobactrum*, *Baccillus*, *Marinobacter*, *Rhodococcus*, *Sphingomonas*, *Xanthobacter*, *Sedimentibacter*, *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas*. Проведене дослідження показало ефективність очищення, перенесення протонів, а також здатність мінімізувати внутрішній опір галофільних штамів порівняно з негалофільними.



Під час дослідження було виявлено, що для ефективної роботи системи та підтримання активності консорціуму бактерій оптимальним є рН близько 7,2, а збільшення відсотку солоності підвищує загальну продуктивність системи.

При початковому значенні ХСК 0,6 г/л ефективність видалення забруднення становила  $87 \pm 1,2$  %. При підвищеному рівні ХСК (1,2 г/л) ефективність очищення дорівнювала  $91 \pm 1,2$  %. Максимальне очищення спостерігалось при найвищій концентрації 1,8 г/л і становило  $93 \pm 1,8$  %.

У якості основних методів контролю обрано визначення рівнів загального хімічного споживання кисню та розчиненого хімічного споживання кисню TCOD і SCOD. Також контролювали показник видалення хрому. Аналіз вмісту хрому в пробах реакторної води показав поступове видалення цього забруднювача, що в результаті привело до показника 81-90 % при концентрації 0,6 і 1,2 г ХСК/л. При підвищеному значенні (1,8 г ХСК/л) показник видалення хрому підвищився до 95 %. При 2,4 г ХСК/л показники ефективності очищення та видалення хрому з стічних вод шкіряної промисловості різко знизилися.

Крім вищезгаданого, була виявлена здатність до біосорбції та біоаккумуляції хрому всередині бактерій, це також продемонструвало ефективність видалення (93-97 %) та відновлення хрому Cr (VI) до Cr (III) [71].

**Приклад 2.** В іншому дослідженні (Rizky I. et al, 2022) було використано 500 мл дубильні відходів у якості субстрата для МПЕ, а також 3 г мулу рисового поля і 3 г глюкози у якості біокатализаторів, що значно підвищило, показники генерації електроенергії. Конфігурація мікробного паливного елемента була двокамерною з анодною камерою заповненою субстратами та алюмінієвими електродами (довжина 15 см, ширина 2 см). Мікробний паливний елемент Dual Chamber MFC, зібраний з пластикових камер (діаметр 9 см, висота 17 см) з протонообмінною мембраною, заповнили сольовим розчином.

В ході спостережень протягом 8 днів за показником електропровідності при використанні рідких відходів від дублення шкіри на глюкозному субстраті та рисовому мулі потужність становила 167,13 Вт. При використанні рідких відходів тільки на глюкозному субстраті потужність була 48,11 Вт. Останній

варіант передбачав використання трьох рідких відходів від дублення шкіри на рисовому мулі, де потужність становила 13,54 мкВт [72].

**Приклад 3.** У третьому дослідженні (G. Fernando, 2016) вивчали аеробний мікробний паливний елемент з інтегрованою системою біореакторів та ефективність процесів очищення модельованих стічних вод фарбувальної промисловості, що містили комерційний азобарвник кислотний помаранчевий ACID ORANGE-7 неочищений, та двох типів інших реальних стічних вод: поліграфічної промисловості й тих, що зазвичай використовуються для фарбування вовни або шкіри, і утворюються з кислотних фарбувальних ванн. Робочий об'єм кожного окремого модуля становив 400 мл. Анод і катод були виготовлені з карбонового паперу. Така конфігурація забезпечила отримання струму більш високої ( $1150 \text{ мАм}^{-2}$ ) щільності.

Температура, за якої проводилась подача забруднених стічних вод до системи, відповідала температурі навколишнього середовища. Було інтегровано три блоки МПЕ, з'єднані в паралельній конфігурації для того, щоб діяти як єдиний модуль. Крім того, було додано аеробний біореактор з системою активного мулу перед системою мікробних паливних елементів, що мало забезпечити повне розкладання барвників у стічних водах.

Загальне видалення барвників у кінцевих стічних водах перевищувало 90 % у всіх експеримента. Зниження ХСК також перевищило 80 % за однакових умов. Гідравлічний час перебування стічних вод на стадії мікробного паливного елемента становив 13,3 години, на аеробній стадії – 22,2 години [73].

**Приклад 4.** У дослідженні (Chih-Yu Chen, et al, 2016) було визначено можливість зменшення концентрації та токсичності важких металів з використанням штаму бактерій *Ochrobactrum sp.* YC211, що має здатність відновлювати хром, і був виділений з стічних вод поблизу заводу з виробництва гальванічних пластин. Прийнятна фактична ефективність видалення становила  $96,5 \pm 0,6\%$ , що відповідає  $30,2 \pm 0,8 \text{ мг Cr}$ , була досягнута *Ochrobactrum sp.* YC211 при 300 мг Cr(VI). Оптимальними параметрами для видалення Cr(VI) були температура 30°C та рН 7. Мікробний паливний елемент з використанням

штамом *Ochrobactrum sp.* YC211 з анаеробним анодом демонструє значно підвищену здатність до генерації електричної енергії та видалення Cr(VI) порівняно з аналогом з аеробним анодом. Максимальна щільність потужності та ефективність видалення Cr(VI) МПЕ становила  $445 \pm 3,2$  мВт м<sup>-2</sup> та  $97,2 \pm 0,3\%$ , відповідно [74].

### **Висновки до розділу 3**

Наведено методики визначення найбільш вагомих показників якості стічних вод, значення яких характеризує якість води, ступінь її забрудненості: вмісту завислих речовин, фосфору, нітритів, показників ХСК, БСК, перманганатного окиснення.

Розглянуто приклади оцінювання ефективності біологічного очищення промислових стічних вод з використанням мікробних паливних елементів різної конфігурації, на підставі чого встановлено, що ефективність біологічного очищення стічної води з використання МПЕ найчастіше оцінюється за такими показникам як ступінь видалення хімічного споживання кисню ХСК та певних забруднювачів, наприклад, важких металів у вигляді хрому, а також електрична потужність системи.

Встановлено, що ефективність деградації забруднювачів у стічних водах та генерації електроенергії залежить як від вихідного складу стічних вод, так і від конфігурації мікробних паливних елементів, виду субстрату, штаму або цілого консорціуму мікроорганізмів. Так, наприклад, серед задіяних у дослідженнях мікроорганізмів найвищу ефективність очищення та генерації електроенергії забезпечують консорціуми галофільних мікроорганізмів, які підвищують ефективність перенесення протонів та зниження внутрішнього опору.

## ВИСНОВКИ

Проведено пошук, аналіз та систематизацію науково-технічної літератури, присвяченої традиційним і сучасним підходам до очищення стічних вод у різних галузях промисловості.

Встановлено доцільність біологічного водоочищення з використанням мікробних паливних елементів (МПЕ), яка полягає у високому рівні деградації забруднюючих речовин у воді та отриманні власної генерованої електроенергії для роботи задіяного технологічного обладнання (насосів, реакторів), комп'ютерів тощо. Завдяки метаболізму мікроорганізмів присутні у стічних водах речовини окиснюються, вивільняючи електрони, які по зовнішньому контуру переходять на катод, де і відбувається їх взаємодія з акцептором з утворенням очищеної води. Проте, дана технологія не відпрацьована, вимагає значних капітальних вкладень та необхідного технологічного обладнання.

На підставі докладного ознайомлення зі структурою, принципом роботи, класифікацією, типовими конструкціями та областями застосування мікробних паливних елементів удосконалено відому технологію біологічного очищення стічних вод шляхом інтегрування до неї біоелектрохімічної системи у вигляді МПЕ, яка працює за схемою: механічне очищення → осадження струвіту для видалення фосфатів → біологічне очищення за допомогою водоростей та МПЕ → мембранне очищення для глибокої фільтрації з метою видалення залишкових зважених часток.

Рекомендовано конструкцію, матеріали і технологічні параметри для забезпечення ефективної роботи мікробного паливного елемента:

- тип конфігурації – двокамерна;
- матеріал анода – графіт, графен, карбонова повсть;
- матеріал катода – біокатод з аеробними мікроорганізмами;
- тип мембрани – катіонообмінна з низьким внутрішнім опором;
- штаб мікроорганізмів/консорціум – *Geobacter*, *Shewanella*; консорціум галофільних мікроорганізмів;
- субстрат – промислові стічні води з вмістом органічних речовин;

- температура – 35-37 °С;
- рН – 7-8.

Визначено методи контролю якості стічних вод, насамперед, за такими показниками як вміст завислих речовин, фосфору, нітритів, ХСК, БСК, перманганатне окиснення, ступінь видалення забруднювача тощо. Ефективність роботи МПЕ оцінюється питомою потужністю.

Запропоновано види сучасного технологічного обладнання для впровадження удосконаленої технології водоочищення у виробництво.

Застосування такої технології дозволяє досягти високих показників очищення промислових стічних вод (видалення до 99,6 % вуглецю, азоту та фосфору) при стабільному виході електроенергії. Отже, інтеграція біоелектрохімічної системи у відому технологію очищення промислових стоків забезпечить вирішення ключових проблем традиційних методів очищення – високої енерговитратності з низькою ефективністю обробки води та деградації складних забруднюючих речовин, зменшить кількість вихідного мулу.

Результати роботи можуть бути корисними у подальших дослідженнях з підвищення ефективності технології очищення стічних вод у напрямку адаптації до їх різних типів та інтеграції у будь-яку сферу виробництва з метою більш широкого впровадження принципів енергозбереження та зменшення екологічного навантаження як на виробництво, так і водні ресурси в цілому. Це сприятиме створенню стійких методів і технологій очищення забруднених промислових стоків.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кодекс України (1995); Закон, Кодекс від 06.06.1995, № 213/95-ВР.  
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/213/95-%D0%B2%D1%80>.
2. Саблій, Л. А. (2013). Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод: монографія. Рівне: НІВГП, 2013, 291.  
ISBN 978-966-327-242-9.
3. Ahmed, R., Block, I., Otte, F., et al. (2023). Activated Carbon from Sugarcane Bagasse: A Low-Cost Approach towards Cr (VI) Removal from Wastewater. *Chemistry*, 5, 1124–1137. DOI:10.3390/chemistry5020077.
4. Barbera, M., Gurnari G. (2018). Wastewater Treatment and Reuse in the Food Industry // In: Wastewater Treatment and Reuse in the Food Industry. Springer, 17–22. ISBN 978-3-319-68442-0 (eBook). DOI:10.1007/978-3-319-68442-0.
5. El Gohary, R. (2015). Agriculture, industry, and wastewater in the Nile Delta. *International Journal of Scientific Research in Agricultural Sciences*, 2, 159–172.
6. Мартинюк, К. В., Андреева, О. А. (2024). Сучасні методи та перспективи біологічного очищення стічних вод. *Global Science: Prospects and Innovations. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference*. United Kingdom, Liverpool: Cognum Publishing House, 43–51.  
URL: <https://sci-conf.com.ua/viii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-science-prospects-and-innovations-28-30-03-2024-liverpul-velikobritaniya-arhiv/>.
7. Wang, C.-Y., Sample, D. J. (2014). Assessment of the nutrient removal effectiveness of floating treatment wetlands applied to urban retention ponds, 137, 23–35.
8. Ranade, V.V., Bhandari V.M. (2014). Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse. Butterworth-Heinemann, 2014, 560.  
ISBN: 978-0-08-099968-5.
9. Iskovich-Lototsky R., Kots I., Ivanchuk Y., et al. (2019). Terms of the stability for the control valve of the hydraulic impulse drive of vibrating and vibro-impact machines. *Przegląd Elektrotechniczny*, 4, 19–23.

10. Jörg, C., Mont, K., Pornsak, S. (2010). Response analysis of nonlinear vibro-impact system coupled with viscoelastic force under colored noise excitations. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(1), 100–108.
11. Айрапетян, Т. С. (2014). Конспект лекцій з дисциплін «Очистка побутових стічних вод» та «Споруди та обладнання водовідведення». Харків: ХНУМГ, 2014, 121.
12. Мартинюк, К. В., Андреєва, О. А. (2024). Ефективність інноваційних біологічних технологій у очищенні стічних вод. *Universum*, 11, 33–39. DOI:10.36074/universum.11.2024.
13. Iorhemen, O. T., Hamza, R. A., Tay, J. H. (2016). Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling. *Membranes*, 6(2), 33. DOI:10.3390/membranes6020033.
14. Rahman, T. U., Roy, H., Islam M. R., et al. (2023). The Advancement in Membrane Bioreactor (MBR) Technology toward Sustainable Industrial Wastewater Management. *Membranes*, 13, 181. DOI:10.3390/membranes13020181.
15. Meng, F., Chae, S.-R., Drews, A., et al. (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Res.*, 43, 1489–1512. DOI: 10.1016/j.watres.2008.12.044.
16. Ekholm, J., et al. (2022). Full-scale aerobic granular sludge for municipal wastewater treatment – granule formation, microbial succession, and process performance, 9(8), 3138–3154. DOI:10.1039/D2EW00653G.
17. Sarma, S. J., Tay, J. H. (2017). Aerobic granulation for future wastewater treatment technology: Challenges ahead. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4, 9–15. DOI:10.1039/C7EW00148G.
18. Hu, H., Li, X., Wu, S., et al. (2020). Sustainable livestock wastewater treatment via phytoremediation: Current status and future perspectives. *Bioresource Technology*, 315, 123809. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123809.
19. Park, J. K., Oh, K. (2023). Advancements in Phytoremediation Research for Soil and Water Resources: Harnessing Plant Power for Environmental Cleanup. *Sustainability*, 18(15),13901. DOI:10.3390/su151813901.

20. Mustafa, H. M., Hayder, G. (2021). Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 355–365. DOI: 10.1016/j.asej.2020.05.009.

21. Bioelectrochemical Systems (BES) for Wastewater Treatment / In: Ghangrekar M. M., Yadav S., Yadava R. N., Biological and Hybrid Wastewater Treatment Technology. Switzerland: Springer Nature, 2024, 383–401. DOI:10.1007/978-3-031-63046-0\_16.

22. Moqsud, M. A., Omine, K., Yasufuku, N., et al. (2013). Microbial fuel cell (MFC) for bioelectricity generation from organic wastes. *Waste Management*, 33(11), 2465–2469. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.07.026.

23. Kothari, R., Pathak, A. K., Singh, H. M., et al. (2024). MFC-mediated wastewater treatment technology and bioelectricity generation: Future perspectives with SDGs 7 & 13. *Process Safety and Environmental Protection*, 657–689. DOI: 10.1016/j.psep.2024.08.078.

24. Wang, H., et al. (2023). Research progress on using biological cathodes in microbial fuel cells for the treatment of wastewater containing heavy metals. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1–9. DOI:10.3389/fmicb.2023.127043.

25. Liu, W. F., Cheng, S. A. (2014). Microbial fuel cells for energy production from wastewaters: the way toward practical application. *Journal of Zhejiang University Science A*, 15, 841–861. DOI:10.1631/jzus. A1400277.

26. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».

27. Водний кодекс України.

28. Державні санітарні правила і норми охорони поверхневих вод (ДСП 173-96).

29. Постанова КМУ №1100 від 25.07.2018.

30. Ковальчук, В. А. (2002). Очистка стічних вод. Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», 2002, 622 с.

31. Brillas, E., Martínez-Huitle, C.A. (2015). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166–167, 603–643.



DOI: 10.1016/j.apcatb.2014.11.016.

32. Мінрегіон України, Наказ №316, редакція від 23.02.2024 Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення.

33. Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 2021, 125(5). DOI: 10.1016/j.elecom.2021.107003.

34. Rabaey, Korneel. (2009). Bioelectrochemical Systems: A New Approach towards Environmental and Industrial Biotechnology. *Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application*, ed. by Korneel Rabaey et al., IWA Publishing, 2009, 1-16.

35. Logan B. E. (2008). Microbial Fuel Cells. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008, 216. ISBN 0470258586.

36. Anjum, A.; Ali Mazari, S.; Hashmi, Z.; Sattar Jatoti, A.; Abro, R. A Review of Role of Cathodes in the Performance of Microbial Fuel Cells. *J. Electroanal. Chem.* 2021, 899, 115673. DOI: 10.1016/j.jelechem.2021.115673

37. Dharmalingam, S.; Kugarajah, V.; Sugumar, M. Membranes for Microbial Fuel Cells. In *Microbial Electrochemical Technology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 143–194. DOI: 10.1016/B978-0-444-64052-9.00007-8

38. Ramirez-Nava, J.; Martínez-Castrejón, M.; García-Mesino, R.L.; López-Díaz, J.A.; Talavera-Mendoza, O.; Sarmiento-Villagrana, A.; Rojano, F.; Hernández-Flores, G. The Implications of Membranes Used as Separators in Microbial Fuel Cells. *Membranes* 2021, 11, 738. DOI: 10.3390/membranes11100738

39. Li, W.W.; Sheng, G.P.; Liu, X.W.; Yu, H.Q. Recent Advances in the Separators for Microbial Fuel Cells. *Bioresour. Technol.* 2011, 102, 244–252. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.03.090

40. Roy, H. (2023). Microbial Fuel Cell Construction Features and Application for Sustainable Wastewater Treatment. *Membranes*, 13(5), 490. DOI:10.3390/membranes13050490

41. Lovley, D. R., Ueki, T. (2011). *Geobacter: The Microbe Electric's Physiology, Ecology, and Practical Applications. Advances in Microbial Physiology.* 59, 1, 100. DOI:10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5.
42. Bond, D. R., Lovley, D.R. (2001). Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(3). DOI: 10.1128/AEM.69.3.1548-1555.2003.
43. Nimje, V.R., Chen, C.-Y., Chen, H.-R., et al. (2012). Comparative bioelectricity production from various wastewaters in microbial fuel cells using mixed cultures and a pure strain of *Shewanella oneidensis*. *Bioresource Technology*, 104, 315–323. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.09.129.
44. Segundo, R.-F., De La Cruz-Noriega, M., Cabanillas-Chirinos, L., et al. (2024). The Potential Use of *Pseudomonas stutzeri* as a Biocatalyst for the Removal of Heavy Metals and the Generation of Bioelectricity. *Fermentation*, 10(2), 113. DOI:10.3390/fermentation10020113.
45. Lovley, D.R. (2006). Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology*, 17(3). 327–332.
46. Franks, A.E.; Nevin, K.P. (2010). Microbial Fuel Cells, A Current Review. *Energies*, 3, 899-919. DOI: 10.3390/en3050899
47. Saleema, D., Ethiraj, B. (2024). Comparison of bioelectricity production from food industry wastewater treatment using *Pseudomonas fluorescens* with *Pseudomonas aeruginosa* in microbial fuel cell. *Advanced Communication Computing and Material Sciences*, 2871(1). DOI: 10.1063/5.0228186.
48. Ulusoy, I., Dimoglo, A. (2018). Electricity generation in microbial fuel cell systems with *Thiobacillus ferrooxidans* as the cathode microorganism. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), 1171-1178. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.155
49. Nemerow, N.L. (2007). Industrial waste treatment / In: Nemerow N.L. Contemporary Practice and Vision for the Future. ButterWorth Heinemann, Elsevier Inc., UK, 2007. P. 568. ISBN: 9780123724939

50. Elsheikh M. A., Al-Hemaidi W. K. (2012). Approach in Choosing Suitable Technology for Industrial Wastewater Treatment. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2(5), 1-10. DOI:10.4172/2165-784X.1000123

51. Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., Burton, F.L. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th Edition. New York: McGraw-Hill, 2004.

52. Айрапетян, Т. С. (2021). Водопостачання та очистка стічних вод промислових підприємств. Харків: нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2021, 120.

53. F. Zhang, Z. Ge, J. Grimaud, J. Hurst and Z. He. (2013). Long-Term Performance of Liter-Scale Microbial Fuel Cells Treating Primary Effluent Installed in a Municipal Wastewater Treatment Facility. *Environmental Science & Technology*, 47, 4941-4948. DOI: 10.1021/es400631r

54. L. Zhuang, Y. Yuan, Y. Wang and S. Zho. (2012). Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater. *Bioresource Technology*, 123, 406-412. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.07.038

55. F. Zhang, Z. Ge, J. Grimaud, J. Hurst and Z. He. (2013). *In situ* investigation of tubular microbial fuel cells deployed in an aeration tank at a municipal wastewater treatment plant. *Bioresource Technology*, 136, 316-321.

DOI: 10.1016/j.biortech.2013.02.107

56. X. Li, N. Zhu, Y. Wang, P. Li, P. Wu and J. Wu. (2013). Animal carcass wastewater treatment and bioelectricity generation in up-flow tubular microbial fuel cells: effects of HRT and non-precious metallic catalyst. *Bioresource Technology*, 128, 454-460. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.10.053

57. Li W.-W., Yu H.-Q., He Z. (2014). Towards sustainable wastewater treatment by using microbial fuel cells-centered technologies. *Energy & Environmental Science*, 3, 126.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/ee/c3ee43106a>

58. Combined mechanical treatment module. URL:

[https://ua.esmil.eu/product/combined\\_mechanical\\_treatment\\_module\\_m-comby/](https://ua.esmil.eu/product/combined_mechanical_treatment_module_m-comby/).

59. Radial scraper. URL: <https://ua.esmil.eu/product/radial-scraper/>.

60. Colsen P-recovery struvite.

URL: <https://www.colsen.nl/en/services/p-recovery-struvite>.

61. Evoqua anaerobic wastewater treatment.

URL: <https://www.evoqua.com/en/evoqua/products--services/anaerobic-wastewater-treatment/digestor-components/pearl-system/>.

62. Biogas MNC UASB. URL: <https://www.biogas-mnc.com/uasb/>.

63. Cambrian Innovation EcoVolt.

URL: <https://www.cambrianinnovation.com/products/ecovolt>.

64. Fuel Cell Earth. URL: <https://www.fuelcellearth.com>.

65. Princeton Applied Research.

URL: <https://www.ameteksi.com/about-us/princeton-applied-research>.

66. LabX. URL: <https://www.labx.com>.

67. Science Exchange. URL: <https://www.scienceexchange.com/s/>.

68. Ecosphere Technologies sewage wastewater treatment.

URL: <https://ecospheretech.com/water-treatment-services/sewage-wastewater-treatment>.

69. Саблій, Л. А., Жукова, В. С., Козар, М. Ю. (2022). Біотехнології очищення води. Лабораторний практикум. Електронне мережне навчальне видання. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022, 55.

70. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моніторинг та інженерні методи охорони довкілля» для студентів напряму підготовки 6.060101 «Будівництво» професійного спрямування «Водопостачання і водовідведення» всіх форм навчання / О. С. Новицька, С. М. Назаров, Т. В. Романенко. Рівне: НУВГП, 2014, 28.

71. Ghorab, R.E.A., et al. (2022). Tannery wastewater treatment coupled with bioenergy production in upflow microbial fuel cell under saline condition. *Environmental Research*, 212, Part B, 113304.

DOI: 10.1016/j.envres.2022.113304. ISSN 0013-9351.

72. Rizky, I. T., Pratomo, B. H., Adelina, W., et al. (2022). Utilization of Microbial Fuel Cells to generate electrical energy from tanning industry waste treatment. *Conference Proceedings*, 2645, 1, 030011.

DOI: 10.1063/5.0112805.

73. Fernando, E., Keshavarz, T., Kyazze G., Fonseka, K. (2016). Treatment of colour industry wastewaters with concomitant bioelectricity production in a sequential stacked mono-chamber microbial fuel cells-aerobic system. *Environmental Technology*, 37, 2, 255-264.

DOI: 10.1080/09593330.2015.1068378.

74. Chih-Yu Chen, et al. (2016). Hexavalent chromium removal and bioelectricity generation by *Ochrobactrum* sp. *YC211* under different oxygen conditions. *Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 51, 6, 2016, 502-508.

DOI: 10.1080/10934529.2015.1128731

ДОДАТОК А

**SCI-CONF.COM.UA**

**GLOBAL SCIENCE:  
PROSPECTS AND INNOVATIONS**



**PROCEEDINGS OF VIII INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE  
MARCH 28-30, 2024**

**LIVERPOOL  
2024**

## TABLE OF CONTENTS

### AGRICULTURAL SCIENCES

- |    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | <i>Брусков В. В., Калинка А. К.</i><br>ОРЕНДА ЗЕМЛІ Є ЕФЕКТИВНИМ І СТАБІЛЬНИМ ДОХОДОМ<br>УКРАЇНСЬКОГО СЕЛЯНИНА       | 11 |
| 2. | <i>Міхсенко В. М.</i><br>ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДООРІЄНТОВАНИХ РІШЕНЬ У<br>ЗЕМЛЕРОБСТВІ                                   | 20 |
| 3. | <i>Тетерюк Р. С., Сахно Т. В., Семенов А. О.</i><br>БІОГАЗОВА ПРОДУКТИВНІСТЬ МІСКАНТУСУ ГІГАНТСЬКОГО<br>ТА КУКУРУДЗИ | 30 |

### BIOLOGICAL SCIENCES

- |    |   |    |
|----|---|----|
| 4. | <i>Bagirova Samira Bahbud, Atayeva Leyla Abulfaz, Shabnam Ashrafova Feyruz, Ahmadova Sariyya Elshan, Aghayeva Jamala Mustafa, Safarov Mirhuseyin Sabri, Nasirli Lala Mikhayil</i><br>BIOECOLOGICAL BASIS OF METHODS OF PHYTOREMEDIATION<br>OF MAN-MADE POLLUTED AREAS | 35 |
| 5. | <i>Мартишок К. В., Андреева О. А.</i><br>СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ БІОЛОГІЧНОГО<br>ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД   | 43 |

### MEDICAL SCIENCES

- |     |  |    |
|-----|--|----|
| 6.  | <i>Bulynina O. D.</i><br>PHYSIOLOGICAL EFFECTS OF REDUCED ATMOSPHERIC<br>PRESSURE  | 52 |
| 7.  | <i>Golovka M., Tsaryk I.</i><br>THE LINKS BETWEEN VITAMIN D DEFICIENCY AND LATENT<br>AUTOIMMUNE DIABETES IN ADULTS                                     | 65 |
| 8.  | <i>Potazanov D., Bobro L., Marchenko A.</i><br>TYPE 2 DIABETES AND COMORBID CONDITIONS IN THE<br>PRACTICE OF A FAMILY DOCTOR                           | 71 |
| 9.  | <i>Бобро Л. М., Марченко А. С., Гуманець К. Р.</i><br>ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ БРОНХІАЛЬНОЮ<br>АСТМОЮ ТА ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ                        | 76 |
| 10. | <i>Бобро Л. М., Марченко А. С., Мальцева К. Є.</i><br>ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІМУНОТЕРАПІЇ ПРИ<br>ЛЕЙКЕМІЇ  | 83 |
| 11. | <i>Гаврилов А. Ю., Путненко І. О., Тороповський С. В., Тінчуріна С. Р.</i><br>ПРЕДИКТОРИ РОЗВИТКУ КОЛОРЕКТАЛЬНОГО РАКУ,<br>СУЧАСНИЙ ПОГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ | 89 |

---

УДК 579.68

**СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ БІОЛОГІЧНОГО  
ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД**

**Мартинюк Катерина Владиславівна,**  
Магістрант

**Адресва Ольга Адіславівна,**  
д.т.н., проф.

Київський національний університет технологій та дизайну  
м. Київ, Україна

**Анотація:** Актуальність даної теми обумовлена антропогенним впливом людини на водні екосистеми, що стає помітно сильнішим, а наслідки - критичнішими. Багато науковців та екологічних ентузіастів розробляють ефективні методи очищення стічних вод, на які припадає найбільший відсоток забруднення водних горизонтів, а також, проводять різноманітні науково-дослідні роботи в пошуках балансу між існуванням людини і природи. Отже, різноманітність джерел забруднення стічних вод росте, і з кожним днем маємо необхідність в пошуках все більш нових і сучасних методів очищення.

Метою даного дослідження був аналіз доступної науково-технічної літератури щодо традиційних та перспективних методів біологічного очищення промислових стоків. При цьому використали такі загальнонаукові методи дослідження, як аналіз, узагальнення та систематизація.

**Ключові слова:** Біологічне очищення, стічні води, мікроорганізми, забруднюючі речовини, активний мул.

Поняття «стічні води» досить широке, тому сюди можна віднести різні за походженням, складом і фізико-хімічними властивостями води, що використовуються людиною задля забезпечення своїх сучасних потреб. Стічні води характеризуються за багатьма різними пунктами, такими як джерело



поток, тип і природа забруднюючої речовини, концентрація та склад.

Розпізнати різні типи стічних вод: господарсько-побутові стічні води; промислові стічні води, фільтрат, стічні води лікувально-профілактичних установ та фармацевтичних підприємств; стічні води сільськогосподарської промисловості; поверхневі стічні води; штучні стічні води. Всі перелічені вище типи стічних вод потребують обов'язкового очищення при відведенні їх у відкриті водойми, оскільки вони містять різні забруднюючі речовини у концентраціях, що перевищують допустимі.

Сьогодні існує багато методів очищення стічних вод: фізико-хімічні методи, механічні, фізичні і окремо хімічні, а також, безпосередньо, біологічні методи очищення. Вибір технології очищення залежить від складу вихідної води, а також, від природи забруднюючої речовини та її концентрації.

Найбільш перспективними та сучасними вважаються біологічні методи очищення води, адже вони мають високу ефективність, економічно вигідні й передбачають застосування найрізноманітніших груп мікроорганізмів, які мають різні характеристики та здатності до окиснення певних видів органічних речовин, а тобто, це досить екологічний спосіб, адже майже повторює ключові природні процеси самоочищення водойм.

Мікроорганізми поширені у водах морів та океанів, їх знаходять на різних глибинах, що коливаються від 3700 до 10000 метрів [1, с. 48]. Найпоширенішим методом очищення стічних вод за допомогою мікроорганізмів на сьогоднішній день є аеробний метод з використанням активного мулу. В останні роки за допомогою нових молекулярно-біологічних методів, зокрема специфічних рРНК проб, в активному мулі показана присутність бактерій родів *Paracoccus*, *Caulobacter*, *Hyphomicrobium*, *Nitrobacter*, *Acinetobacter*, *Sphaerotilus*, *Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Cytophaga*, *Flavobacterium*, *Flexibacter*, *Halisomenobacter*, *Artrobacter*, *Corynebacterium*, *Microtrix*, *Nocardia*, *Rhodococcus*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Staphylococcus* [2, с. 7410].

Основний принцип, що лежить в основі даного процесу, полягає в тому, що мікроорганізми ростуть у метаболізуючих органічних матеріалах, де вони

формується в згустки. Речовина, що окиснюється, використовується як їжа для мікроорганізмів, які утворюють зважені частинки у стічних водах.

Незважаючи на такі переваги як низькі експлуатаційні витрати з додатковою ефективністю оброблення, основним недоліком є утворення надмірної кількості відходів активного мулу. Органічну речовину, що утворюється в результаті даного процесу, необхідно належним чином обробляти та утилізувати.

Але очищення стічних вод методом активного мулу не обмежується. Сьогодні багато науковців ведуть свої дослідження над можливостями інших мікроорганізмів, таких як гриби, мікрододорості тощо. Вони стали ідеальними біоагентами для ремедіації (вилучення забруднень з води) завдяки високому відношенню площі поверхні до об'єму [3, с. 508]. Так, наприклад, *Eichhornia crassipes* може застосовуватись при очищенні евтрофної води (тобто води, багатой на поживні речовини для рослин), впливаючи на синтез азоту. *Tolypothrixceytonica* та *Anabaena oryzae* також показали свою ефективність в очищенні промислових стічних вод [4, с. 183]. *Aphanocapsu sp.* і *Plectonema sp.* мають здатність розкладати сиру нафту. Такі бактерії як *Desulfobivrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfobacter* і *Desulfococcus genera* виявились ефективними сульфат-відновлюючими бактеріями [5].

Стічні води текстильної та шкірообробної промисловості також мають критично негативний вплив на загальний стан водойм. Попередні дослідження [6, с. 19] показали, що стічні води шкіряних заводів містять високі концентрації сульфатів і кальцію, різноманітні неорганічні й органічні добавки і хімічні речовини, а також барвники в концентраціях від 10 до 200 мг/л. Наприклад, *Aeromonas Hydrophila*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* мають великий потенціал в біоремедіації азобарвників [7]. В безкисневих умовах *Pseudomonas sp.*, *Pseudomonas luteola*, *Proteus mirabilis* – руйнують азобарвники. Ці бактерії використовують окисно-відновні ферменти для розкладу барвників. Аеробні бактерії використовують азоредуктазу, що каталізується киснем, для розриву азотвмісних зв'язків.

Деякі штами бактерій розщеплюють барвники в аеробних умовах і використовують моно- та діоксигеназу для окиснення ароматичного кільця органічних сполук.

Також досить поширена деградація нафтохімічних забруднювачів мікроорганізмами. Їх розкладання є складним і залежить від природи та кількості доступних вуглеводнів. Біологічний розпад вуглеводнів визначається такими факторами, як температура та концентрація неорганічних поживних речовин, наприклад, фосфору, азоту та заліза в деяких випадках [8, ст. 805].

Вразливість вуглеводнів до мікробіологічного розкладання різна, причому лінійні алкани більш сприйнятливі, а циклічні алкани найменше [9, 10]. Поліциклічні вуглеводні з більшою молекулярною масою можуть не розкладатися. *Acinetobacter sp.* розкладає n-алкан з довжиною ланцюга C10-C40, використовуючи вуглець як єдине джерело [11, с. 4542].

*Mycobacterium, Burkholderia, Gordonia, Brevibacterium, Dietzia, Aeromicrobium, Pseudomonas, Aeromonas, Flavobacteria, Nocardia, Modococci, Chrobacteria, Moraxella, Cyanobacteria, Streptomyces, Bacilli, Arthrobacter* та інші бактерії також можуть розкладати нафтопродукти [12, с. 1152]. Поліароматичні вуглеводні можуть бути розщеплені *Sphingomonas* [13, с. 440].

Також дослідники вивчали роль бактерій у видаленні зі стічних вод пестицидів, а саме видалення ендосульфану *Bacillus* і *Staphylococcus* [14, с. 564]. Це інсектицид широкої дії, що використовується для контролю комах на овочах, фруктах, зернових, бавовні, листі чаю, а також на декоративному чагарнику, винограднику та деяких деревах. Проте, Ендосульфан є однією з основних причин отруєнь людини у багатьох країнах. Видалення малатіону зі стічних вод *Arthrobacter sp., Pseudomonas putida* розглянуто у роботі [15, с. 26-29]. Малатіон є фосфорорганічним інсектицидом, дія якого направлена проти сисних і гризучих комах. Він також ефективний проти рослиноїдних кліщів. Можливість видалення ридомілу і фіторази *Pseudomonas putida* і *Acinetobacter sp.* [16, ст. 2228]. Ридоміл та фітоراز це фунгіцидні засоби, які застосовуються для попередження фітофторозу та інших

грибкових захворювань рослин. Видалення нафтелену ціанобактеріями [17]. Нафтелен, або нафталін є найпростішим представником вуглеводнів з конденсованими ароматичними кільцями, тобто такими, що легше окиснюються. Свого часу його застосовували як інсектицид.

Такі важкі метали, як свинець, кадмій, хром, миш'як і ртуть, є повсюдними забруднювачами і мають високу токсичність та щільність. Мікроорганізми також мають здатність трансформувати та поглинати важкі метали. Було опубліковано багато досліджень про роль ендоефітних бактерій у біонакопиченні та детоксикації важких металів [18, с. 384; 19, с. 330]. Ендоефіти – бактерії, що ізолюються від рослин, поверхню яких було продезинфіковано, чи екстрагуються з внутрішніх рослинних тканин, і не спричиняють видимої шкоди рослині-господарю.

За результатами згаданих вище досліджень встановлено виділення бактеріями органічних кислот, які допомагають в процесі біоремедіації забруднень зі стічних вод.

Важкі метали можна відновити до менш токсичних металів за допомогою бактерій, що відновлюють залізо, наприклад, *Geobacter sp.*, і бактерій, що відновлюють сірку, наприклад, *Desulfuromonas sp.*

Сульфатвідновлюючі бактерії та бактерії, що відновлюють метали, можуть перетворювати хром із високотоксичного Cr (VI) на менш токсичний Cr (III). Сульфатвідновлюючі бактерії виробляють багато сірководню, який викликає осадження катіонів металів. Штам *Vibrio harveyi* показав свою здатність осаджувати двовалентний свинець у вигляді солі фосфату свинцю.

У ремедіації металів також важливе мікробне метилювання. Наприклад, *Bacillus sp.*, *Clostridium sp.*, *Pseudomonas sp.* і *Escherichia sp.* можуть біометилувати Hg (II) [20, с. 401].

Здатні брати участь у видаленні забруднюючих речовин (особливо важких металів) і гриби, перетворюючи ці речовини на менш токсичні їх форми. Гриби легко вирощувати, отримуючи значну кількість біомаси [21].

Перспективним вважається так звана фітореMediaція – використання певних видів еукаріотичних водоростей і ціанобактерій для біологічного очищення стічних вод [22, с. 35]. Наприклад, *Chlorella sp.*, *Picochlorum sp.*, *Tetraselmis sp.*, *Scenedesmus sp.* та декі інші штами водоростей і ціанобактерій - *Anabaena sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Spirulina sp.*, *Chroococcus sp.*, *Pseudosporangiococcus sp.*, *Scytonema sp.*, *Dolichospermum* [23, с. 168].

До чинників, що роблять водорості ідеальними кандидатами для очищення стічних вод, належить: здатність водоростей використовувати для свого росту присутні у стічних водах вуглець, азот і фосфор; їх короткий життєвий цикл, що потребує менше поживних речовин; повторне використання біомаси водоростей через механізм адсорбції та десорбції; незалежність зростання біомаси водоростей від умов навколишнього середовища, отже, біомаса може вироблятися протягом року; більш висока ефективність біомаси водоростей, ніж у мембрани для видалення важких металів; джерело кисню допомагає в процесі деградації токсичних речовин гетеротрофним бактеріям; ефективні як на анаеробних, так і на аеробних очисних установках.

**Висновки.** На підставі аналізу літератури встановлено, що найбільш перспективними й цікавими для виробників та науковців є біологічні методи очищення води. Адже така велика кількість мікроорганізмів у навколишньому середовищі відкриває широкі простори для дослідження ще більш нових методик, що будуть виявляти свою ефективність і для висококонцентрованих стічних вод із вмістом токсичних речовин. Це дозволить зменшити вплив виробничої діяльності людини на водні екосистеми, а масовість застосування цих методів зробить їх більш економічно вигідними в порівнянні зі звичайними хімічними методами очищення.

Отже, для біологічного очищення промстоків сьогодні використовуються бактерії, гриби, водорості та інші мікроорганізми. Їх властивості та спектр дії на різні забруднюючі речовини дуже широкий, що допомагає зробити очищення стічних вод не тільки ефективними, а й подібним до процесів самоочищення водойм; це дозволить у разі впровадження цих методів

зменшити експлуатаційні та фінансові витрати при проєктуванні очисних споруд.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чуб І. М., Шевченко Т. О., Дідріх Д. Приклади застосування мембранних біореакторів Alfa Laval для очистки побутових стічних вод. *Водопостачання та водовідведення*, 2019. № 2. с. 46-54.
2. Filho D. G., Silva A. G., Guidini C. Z. Lipases: sources, immobilization methods and industrial applications. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2019.103(18). pp. 7399–7423. doi.: 10.1007/s00253-019-10027-6.
3. Hassaan M. A, El Nembr A. Advanced Oxidation Processes for textile wastewater treatment. *Int J Photochem Photobiol*, 2017. Vol. 2, No. 3. pp. 507-508.
4. Srinivasan S., Sadasivam S. K. Exploring docking and aerobic-microaerophilic biodegradation of textile azo dye by bacterial systems. *J Water Process Eng.*, 2018. 22. pp. 180-191.
5. Franca R. D. G., Vieira A., Carvalho G., et al. Oerskovia'paurometabola can efficiently decolorize azo dye acid red 14 and remove its recalcitrant metabolite. *Ecotoxicol Environ Saf.*, 2020.191. 110007.
6. Chowdhury M., Mostafa M. G., Biswas T. K. & Saha A. K. Treatment of leather industrial effluents by filtration and coagulation processes. *Water Resour. Ind.*, 2013.3. pp. 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2013.05.002>.
7. Hansen É., Monteiro de Aquim P., Hansen A. W., Cardoso J. K., Ziulkoski A. L. & Gutterres M. Impact of post-tanning chemicals on the pollution load of tannery waste water. *J. Environ. Manage.* 2020, 269. 110787. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110787>.
8. Nikolopoulou M., Kalogerakis N. Biostimulation strategies for fresh and chronically polluted marine environments with petroleum hydrocarbons. *J Chem Technol Biot*, 2009. 84, p. 802-807.
9. Sathishkumar P., Meena R. A. A., Palanisami T., et al. Occurrence, interactive effects and ecological risk of diclofenac in environmental compartments

and biota-a review. *Sci Total Environ*, 2020. 698. 134057.

10. Narayanan M., El-Sheekh M., Ma Y., et al. Current status of microbes involved in the degradation of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) pollutants in the aquatic ecosystem. *Environ Pollut*, 2022. 300. 118922.

11. Chojnacka K., Skrzypczak D., Izydorczyk G., et al. Biodegradation of pharmaceuticals in photobioreactors—a systematic literature review. *Bioengineered*, 2022. 13. pp. 4537-4556.

12. Amran R. H., Jamal M. T., Pugazhendi A., et al. Biodegradation and Bioremediation of Petroleum hydrocarbons in marine Ecosystems by microorganisms. A review. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2021. 21(3). pp. 1149-1157.

13. Castelo-Grande T., Augusto P .A., Monteiro P., et al. Remediation of soils contaminated with pesticides: a review. *Int J Environ Analyt Chem*, 2010. 90, pp. 438-467.

14. Wu H., Zhang J., Li P., et al. Nutrient removal in constructed microcosm wetlands for treating polluted river water in northern China. *Ecol Eng*, 2011. 37. pp. 560-568.

15. Wang C.-Y., Sample D.J. Assessment of the nutrient removal effectiveness of floating treatment wetlands applied to urban retention ponds. *J Environ Manag*, 2014. 137. pp. 23-35.

16. Mónica P., Darwin R. O., Manjunatha B., et al. R. Evaluation of various pesticides-degrading pure bacterial cultures isolated from pesticide-contaminated soils in Ecuador. *African Journal of Biotechnology*, 2016. 15. pp. 2224-2233.

17. Igiri B.E., Okuduwa S. I. R., Idoko G. O., et al. Toxicity and bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems from tannery wastewater: a review. *Hindawi J. Toxicol*, 2018. 2568038.

18. Sinha S. N., Biswas M., Paul D., et al. Biodegradation potential of bacterial isolates from tannery effluent with special reference to hexavalent chromium. *Biotechnol bioinforma bioeng*. 2011, 1. pp. 381-386.

19. Priyalaxmi R., Murugan A., Raja P., et al. Bioremediation of cadmium by

*Bacillus safensis* (JX126862), a marine bacterium isolated from mangrove sediments. *Int J Curr Microbiol App Sci.*, 2014. 3. pp. 326-335.

20. Fauziah S. H. Assessing the bioaugmentation potentials of individual isolates from landfill on metal-polluted soil. *Environ Earth Sci*, 2017. 76, p. 401.

21. Agrawal K, Verma P. Myco-valorization approach using entrapped *Myrothecium verrucaria* ITCC-8447 on synthetic and natural support via column bioreactor for the detoxification and degradation of anthraquinone dyes. *Int Biodeterior Biodegrad.* 2020.153.105052.

22. Ashokkumar P., Loashini V. M., Bhavya V. Effect of pH, Temperature and biomass on biosorption of heavy metals by *Sphaerotilus natans*. *Int J Microbiol Mycol*, 2017. 6. pp. 32-38.

23. Achal V., Kumari D., Pan X. Bioremediation of chromium contaminated soil by a brown-rot fungus, *Gloeophyllum sepiarium*. *Res J Microbiol*, 2011. 6. pp. 166-171.



## ДОДАТОК Б



**ЗМІСТ****РОЗДІЛ 1.****ФІНАНСИ ТА БАНКІВСЬКА СПРАВА;  
ОПОДАТКУВАННЯ, ОБЛІК І АУДИТ**

СУТНІСТЬ МЕТОДІВ ТА СПОСОБІВ ПОДАТКОВОГО КОНТРОЛЮ В УКРАЇНІ  
Тхач Т.В., Науковий керівник: Артюх О.В. .... 5

**РОЗДІЛ 2.****МАРКЕТИНГОВА ТА ЛОГІСТИЧНА ДІЯЛЬНІСТЬ**

РОЛЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІМІДЖЕВОЇ СТРАТЕГІЇ В ГЛОБАЛЬНОМУ  
МАРКЕТИНГОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ  
Стоцька Д.В., Дугінець Г.В. .... 10

**РОЗДІЛ 3.****МЕНЕДЖМЕНТ, ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ  
ТА АДМІНІСТРУВАННЯ**

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ТРУДОВИМИ ВІДНОСИНАМИ В  
УМОВАХ ВІЙНИ В УКРАЇНІ: АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДИХ ТА ЇХ  
ВПРОВАДЖЕННЯ  
Яворський О.А., Науковий керівник: Гаврилюк А.М. .... 17

**РОЗДІЛ 4.****ПРАВО ТА МІЖНАРОДНЕ ПРАВО**

ПРОЦЕДУРИ ОСКАРЖЕННЯ ВІДКРИТИХ ТОРГІВ  
Арнаутова А.С., Науковий керівник: Коваленко Л.П. .... 26

**РОЗДІЛ 5.****БІОЛОГІЯ ТА БІОТЕХНОЛОГІЇ**

ЕФЕКТИВНІСТЬ ІННОВАЦІЙНИХ БІОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ОЧИЩЕННІ  
СТІЧНИХ ВОД  
Мартинюк К.В., Науковий керівник: Андреева О.А. .... 33

**РОЗДІЛ 6.****ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ**

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ  
ВИБОРУ ХМАРНИХ ІНФРАСТРУКТУРНИХ КОМПОНЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ  
СИСТЕМ НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВИМОГ  
Цвіркун О.А., Науковий керівник: Селанов М.В. .... 40

**РОЗДІЛ 5.**

БІОЛОГІЯ ТА БІОТЕХНОЛОГІЇ

**Мартинюк Катерина Владиславівна**

здобувач вищої освіти факультету хімічних та біофармацевтичних технологій  
*Київський національний університет технологій та дизайну, Україна*

**Науковий керівник: Андрєєва Ольга Адіславівна**

Д-р. техн. наук, професор кафедри біотехнології, шкіри та хутра  
*Київський національний університет технологій та дизайну, Україна*

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ІННОВАЦІЙНИХ БІОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ОЧИЩЕННІ СТІЧНИХ ВОД

**АНОТАЦІЯ.** Стічні води – води, що були піддані антропогенному впливу людини, містять забруднюючі речовини або певні домішки механічного або хімічного, біологічного характеру і потребують очищення перед поверненням назад до водойми. Екологічні наслідки до яких призводить недостатнє очищення стічних вод вражають своєю інтенсивністю та глобальністю. На жаль, не кожен розуміє загрозу даної проблеми для навколишнього середовища і для майбутнього людини, адже нехтування нагальним вирішенням цього питання має загальносуспільний характер. Кількість підприємств різного роду промисловості в Україні з кожним роком збільшується, а з тим збільшується і кількість технологічних і виробничих стічних вод, які скидаються в міські каналізаційні системи або водойми і водні об'єкти. Стандартні методи біологічного очищення і справді показали гарне забезпечення якості води, що скидається. Але на сьогоднішній день з'являється багато відкритих питань утилізації відпрацьованого мулу, хімічних реагентів та інших ресурсів, що застосовуються на очисних спорудах, а також економічності і ресурсоефективності даних методів. *Актуальність* даної статті в тому, щоб звернути увагу промислових споживачів води на важливість правильного та ефективного очищення стічних вод перспективними новітніми методами та технологіями біологічного очищення, що дозволяють ефективно використовувати вихідні ресурси з можливістю отримати нові, особливо енергетичні, що дозволить забезпечити політику зеленого сталого розвитку підприємств задля збереження навколишнього природного середовища. Застосування нових методів і технологій в сфері очищення промислових стічних вод дозволить зменшити витрати, знизити рівень відходів що потрібно утилізувати, скоротить час та об'єми роботи для проведення очищення. Метою статті є ознайомлення з існуючими характеристиками стічних вод, стандартними методами їх обробки, а також розглянути новітні методи біологічного очищення стічних вод,

перспективами інтеграції різноманіття асоціацій мікроорганізмів в масове промислове застосування, їх перевагами і недоліками.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** біологічне очищення, стічні води, мікроорганізми, гранульований осад, мікробні паливні елементи, мембранні біореактори, біоелектрохімічні системи.

Будь-які стічні води можна характеризувати відповідно до джерела потоку і природи забруднюючої речовини. Відповідно до джерела забруднення вони поділяються на господарсько – побутові та промислові, а також поверхневі стічні води.

Господарсько-побутові стічні води – це такі води, що скидаються з житлових будинків або громадських закладів та державних установ. Зазвичай, забруднені фізіологічними продуктами життєдіяльності людини або побутовою хімією.

Промислові стічні води – даний тип стічних вод можна умовно розділити на виробничі та технологічні стічні води. Виробничі, відповідно, утворюються в процесі певного виробництва, і для кожної галузі мають специфічні забруднюючі компоненти. Технологічні стічні води – це води, що утворюються в процесі охолодження систем, промивання і обслуговування технічного обладнання та підприємства.

Фільтрат – це надзвичайно токсичні рідкі стоки, джерелами утворення якого є опади, які проходячи через шар відходів, вимивають з них розчинні у воді речовини, а також продукти розкладання відходів органічного походження. У фільтраті містяться органічні відходи, що частково розклалися, продукти корозії металів і інші водорозчинні забруднення, зокрема кольорові й важкі метали, а також токсичні або біологічно активні забруднення, такі як відходи фармацевтичної промисловості та мікрозабрудники [1].

Отже, виходячи з класифікації, можна зробити висновок, що стічні води містять широкий спектр специфічних, токсичних за впливом, і хімічних або механічних за природою походження забруднюючих речовин. Тому, спосіб їх вилучення повинен бути ефективним і комплексним, щоб забезпечити їх остаточне знешкодження. Від цього і буде залежати метод очищення. В більшості випадків з цим допомагають справитись загальноприйняті і традиційні фізико – хімічні методи очищення стічних вод [2].

Виділяють механічні методи очистки, фізико – хімічні, та біологічні залежно від потреби. Для поліпшення органолептичних властивостей застосовують методи прояснення і знебарвлення води, дезодорацію; для забезпечення епідеміологічної безпеки застосовують хлорування, озонування або інші методи знезараження; для кондиціонування мінерального складу застосовують такі методи як пом'якшення, знесолення,

## РОЗДІЛ 5. БІОЛОГІЯ ТА БІОТЕХНОЛОГІЇ

знезалізнення, фторування і тому подібне.

Так як промислові стічні води характеризуються високими концентраціями, нерівномірністю надходжень на споруди очищення, різною дисперсністю забруднень, та багатьма іншими характеристиками. Для очищення, загалом, використовують як окремі, так і поєднані методи, які включають в себе механічне очищення, тобто видалення фізичних домішок, попереднє очищення фізико – хімічними методами, а також біологічне очищення для доведення всіх показників до вимог затверджених МОЗ [3].

Основною проблемою класичних методів біологічного очищення є недостатнє забезпечення очищення забрудненого осаду, який потребує утилізації. Щорічно б'єм таких осадів або мулових відкладень збільшується, джерел утворення також стає все більше і більше. Саме тому існує значна необхідність в нових і нових дослідженнях в цій галузі [4].

І такі дослідження проводяться, і досить успішно. На даний момент можна знайти досить великі об'єми інформації про новітні розробки і дослідження методів біологічного очищення стічних вод.

Основна ціль біологічного очищення полягає у трансформації розчинених та твердих компонентів, що підлягають біологічному розкладанню з утворенням прийнятних кінцевих продуктів. Для промислових стічних вод – видалення або суттєве зменшення концентрації органічних і неорганічних речовин, оскільки деякі компоненти можуть виявитись токсичними для мікроорганізмів. Саме тому може знадобитись і попереднє очищення, перш ніж вода пройде біологічний етап очищення і буде скинута в міську каналізаційну систему або водойму.

Для перетворення розчинених і твердих органічних речовин у прості кінцеві продукти і додаткову біомасу використовують різноманітні мікроорганізми. Основні механізми включають аеробні процеси та анаеробні процеси.

Аеробні процеси відбуваються за наявності кисню, за участі бактерій які використовують органічні речовини як джерело енергії, розкладаючи їх до вуглекислого газу, води та біомаси. Основні бактерії, що використовуються в даному процесі *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Nitrosomonas* та *Nitrobacter*. Механізми аеробних процесів можна описати даним рівнянням (1):



Анаеробні процеси проходять без доступу кисню, і в даному механізмі основну роль відіграють анаеробні мікроорганізми, що розкладають органічні сполуки до метану і вуглекислого газу та біомаси, також, цей менш енергозатратний процес, тому що біогаз, який виробляється в процесі анаеробних процесів можна використовувати як джерело енергії. Для зображення даного механізму процесу можна використати відповідне хімічне

рівняння (2):



Основні найбільш поширені мікроорганізми, які використовуються в анаеробному очищенні це *Methanosaeeta* і *Methanosarcina* [5].

Важливу роль для застосування біологічного очищення стічних вод відіграють і правильно підібрані і застосовані біологічні системи. Їх можна поділити на різні типи, які будуть залежати від умов і методу проведення процесу очищення.

Виділяють аеробні системи, анаеробні системи та факультативні системи, тобто такі, в яких можуть відбуватись процеси очищення як в анаеробних так і аеробних умовах.

Аеробні системи включають в себе аеротенки- ємності закритого типу, в яких стічні води змішуються з активним мулом і киснем; біофільтри – фільтри, що заповнені спеціальним матеріалом, на якому розвиваються мікроорганізми. В системі даного типу органічні речовини стічних вод що проходять через фільтри окиснюються мікроорганізмами [6].

Мембранні біореактори (МБР), тобто системи з рухомими біоплівками – теєхнологія застосування спеціальних носіїв для мікроорганізмів, які рухаються разом з водою і забезпечують ефективне очищення [7].

Анаеробні системи включають в себе анаеробні реактори та метантенки. Анаеробні реактори – це ємності, де стічні води обробляються анаеробними мікроорганізмами, з утворенням біогазу. Метантенки – це спеціальні реактори, де відбувається анаеробне розкладання органічних речовин з утворенням метану.

До факультативних систем можна віднести ставки окиснення, в якості яких виступають природні або штучні водойми, де очищення стічних вод відбувається як аеробними так і анаеробними мікроорганізмами [8].

Ці системи можна інтегрувати як окремо, так і комбінувати їх між собою задля досягнення максимальної ефективності очищення стічних вод, а також, для мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Нові методи біологічного очищення стічних вод включають в себе багато нових технологій та методів для ефективного видалення забруднень з води. Наприклад, значної популярності за останні 4-5 років набувають такі методи і технології як фітореємедіація, використання мікробіологічних паливних елементів (МПЕ), технології аеробних гранул, технології мембранних біореакторів (далі МБР), також значна кількість досліджень проводиться в галузі біоелектрохімічних систем (БЕС).

Очищення стічних вод з використанням біоелектрохімічних систем (БЕС) є інноваційними технологіями. Даний метод базується на використанні мікроорганізмів для розкладу органічних речовин в стічних водах та

## РОЗДІЛ 5. БІОЛОГІЯ ТА БІОТЕХНОЛОГІЇ

одночасному отриманні і генерації електричної енергії, що робить цей метод ефективним в майбутньому з економічної точки зору.

Механізм роботи наступний: використовуються анодні і катодні процеси. В анодній камері мікроорганізми окиснюють органічні речовини з утворенням протонів що проходять через мембрану до катодної камери, і електронів які передаються на анод. На катоді, в свою чергу, відбувається процес відновлення електронів, де утворюється водень, або кисень відновлюється до води. Це замикає електричний ланцюг і дозволяє генерувати електричну енергію [9].

Наступним інноваційним і провідним методом є використання технології мембранних біореакторів (МБР) що поєднує в собі біологічне очищення та мембранну фільтрацію.

Основними принципами роботи даної технології є проходження стічними водами біологічного реактора на першому етапі, під час якого мікроорганізми утворюють активний мул, що розкладає органічні речовини.

Після першого етапу біологічного очищення стічні води проходять через ультрафільтраційний або мікрофільтраційний мембранний модуль, що відділяє тверді частинки та інші забруднювачі від мікроорганізмів. Для ефективної роботи системи використовується аерація. Це забезпечує перемішування стічних вод і як результат, рівномірний розподіл мікроорганізмів в біореакторі, а також постачання кисню для запобігання утворенню осадів. Нові МБР системи дозволяють ефективно усувати з стічних вод азот та фосфор [10].

Фіторемедіація – екологічно стійка стратегія очищення стічних вод. Це один інноваційний метод, сенс якого полягає у здатності рослин поглинати та очищувати забруднювачі, шляхом накопичення їх у собі, очищаючи таким чином воду. Технологія фіторемедіації показала ефективність очищення як і від важких металів.

Основними механізмами є здатність рослин поглинати забруднюючі речовини через коріння і накопичувати їх – фітоекстракція; розклад забруднюючих речовин за допомогою ензимів рослин – фітодеградація; перетворення забруднюючих речовин у газоподібні фракції, які в подальшому випаровуються через листя – фітоволатилізація.

Наприклад, такі рослини як водяний гіацинт, попри те що є одночасно токсичним видом, може ефективно справлятися з видаленням зі стічних вод важких металів. Водяний гіацинт має унікальну здатність природним чином поглинати токсичні речовини, такі як свинець, ртуть, стронцій-90 та інші канцерогенні сполуки.

Коріння водяного гіацинта створює середовище, сприятливе для росту аеробних бактерій, які допомагають у видаленні різних забруднень з води. Цей природний процес покращує процес очищення води [11].

Біологічні методи очищення за допомогою гранульованого осаду (АГС) набувають все більшої популярності, так як це достатньо економічно вигідно завдяки низькому енергоспоживанню і витратам вхідної сировини.

Технологія застосування АГС дозволяє одночасно видаляти зі стічних вод і азот, і фосфор, і вуглець. Принцип роботи полягає у використанні гранул, що складаються з мікроорганізмів, і мають здатність швидко осідати, за рахунок чого відбувається ефективне відокремлення біомаси від очищеної води.

Ці гранули складаються з декількох шарів: зовнішнього – з аеробних бактерій які окиснюють органічні речовини, амоній; внутрішній – містить також анаеробні бактерії для ефективного видалення фосфору і денітрифікації.

Відбуваються ці процеси в спеціальних реакторах які експлуатуються як реактори послідовної дії з одночасною анаеробною подачею і відведенням стічних вод за якою слідує аеробна фаза змішаної реакції і безпосереднє відстоювання [12].

Сьогодні знання про продуктивність процесу в різних умовах навколишнього середовища все ще обмежені, тим не менш, у світі вже експлуатуються близько 80 установок АГС, і ці реактори демонструють ефективне видалення органічних речовин, азоту і фосфору навіть в умовах великих коливань температур [13].

Використання мікробних паливних елементів МПЕ пропонує екологічно стійку стратегію управління відходами. За допомогою даного методу можна генерувати електроенергію з одночасним очищенням стічних вод. Така технологія вважається перспективною і економічно вигідною.

Принцип роботи полягає у окисненні органічних речовин бактеріями, що продукують електрони та протони на аноді в анаеробних умовах. Утворення електричного струму відбувається за рахунок відновлення кисню до води електронами, що передаються через зовнішнє електричне коло з анода до катода.

Також, останні дослідження показують що технологію МПЕ можна застосовувати для очищення стічних вод від важких металів знижуючи їх токсичність. Наприклад, важкі метали з високими редокс-потенціалами, такі як Cr (VI) та Cu (II) можуть відновлюватись до менш токсичних форм [14].

Загалом, при використанні даного методу використовують різні типи електродів та заданих параметрів для даних систем, таких як, наприклад, рН, концентрація важких металів, потенціал електрода. Також, розробляються біокатоли, в даному випадку мікроорганізми діють як біокаталізатори [15].

**Список використаних джерел:**

[1] Imran Ali, Iffat Naz, Changsheng Peng, Kamel A. Abd-El Salam, Zahid M. Khan, Tariqul Islam. Book:



## РОЗДІЛ 5.

## БІОЛОГІЯ ТА БІОТЕХНОЛОГІЇ

- Aquananotechnology, chapter 2: Sources, classifications, constituents, and available treatment technologies for various types of wastewater: An overview. 2021, p. 11-46. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821141-0.00019-7>.
- [2] Нехоз О. І. Кавітаційна технологія очищення стічних вод від токсичних речовин / О. І. Нехоз, О. А. Литвиненко, Р. В. Логвинський // Всеукраїнський науково-технічний журнал "ВІБРАЦІЇ В ТЕХНІЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЯХ". - 2012. - Т. 2, вип. 66. - С. 112-115.
  - [3] Снежкін Ю. Ф. Стан технологій очищення стічних вод в Україні та світі / Ю. Ф. Снежкін, Ж. А. Петрова, В. М. Пазюк, Ю. П. Новікова // Теплофізика та теплоенергетика. - 2021. - Т. 43, вип. 1. - С. 5-12. - <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1>.
  - [4] Саблій Л. А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод.: монографія / Л. А. Саблій - Рівне: НУВГП, 2013. - 219 с. - ISBN 978-966-327-242-9.
  - [5] Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous G., Lburton F., Stensel H. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery: book. New York: McGraw Hill; 5th edition, 2014. 2048 p.
  - [6] Biological Treatment Processes: Volume 8: handbook / за ред. Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, Yung-Tse Hung. New York: Springer; 2009th edition, 2008. 840 с.
  - [7] Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review / Di Biase A. et al. // Journal of Environmental Management. 2019., No. 2019 Vol. 247. P. 849-866. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.053>.
  - [8] Anaerobic-aerobic treatment of wastewater and leachate: A review of process integration, system design, performance and associated energy revenue / Saurabh M. et al. // Journal of Environmental Management. 2023., No. 12 Vol. 327, 116898. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116898>.
  - [9] Cerillo M., Riau V. Recent Advances in Bioelectrochemical Systems for Nitrogen and Phosphorus Recovery Using Membranes // Membranes. 2023., No. 2 Vol. 13. P. 186.
  - [10] Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment: Current Status, Novel Configurations and Cost Analysis // The Handbook of Environmental Chemistry, chapter / Asif M. et al. M., Negm, A.M. (eds) Cost-efficient Wastewater Treatment Technologies... Switzerland, 2023. Vol. 118, P. 147-167. [https://doi.org/10.1007/978\\_2022\\_871](https://doi.org/10.1007/978_2022_871).
  - [11] Park JK, Oh K. Advancements in Phytoremediation Research for Soil and Water Resources: Harnessing Plant Power for Environmental Cleanup. Sustainability. 2023., No. 18 Vol 15, 13901. <https://doi.org/10.3390/su151813901>.
  - [12] Full-scale aerobic granular sludge for municipal wastewater treatment – granule formation, microbial succession, and process performance / Ekholm J. et al. // Environmental Science: Water Research & Technology. 2022., No. 9 Vol. 8. P. 3138-3154. <https://doi.org/10.1039/D2EW00653G>.
  - [13] The Performance of Aerobic Granular Sludge Under Different Aeration Strategies at Low Temperature. / Xu J. et al. // Water Air Soil Pollut. 2022., No. 43 Vol. 233. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05506-y>.
  - [14] Research progress on using biological cathodes in microbial fuel cells for the treatment of wastewater containing heavy metals / Wang H. et al. // Frontiers in Microbiology. 2023., Vol. 14. P. 1-9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.127043>.
  - [15] A concise review on wastewater treatment through microbial fuel cell: sustainable and holistic approach. / Kunwar S. et al. // Environ Sci Pollut Res. 2023., Vol. 31. P. 6723-6737. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31696-x>.

## ДОДАТОК В

**CERTIFICATE**


is awarded to

**Martyniuk Kateryna**for being an active participant in  
VIII International Scientific and Practical Conference**“GLOBAL SCIENCE:  
PROSPECTS AND INNOVATIONS”****24 Hours of Participation**  
**(0,8 ECTS credits)****LIVERPOOL**

28-30 March 2024

**sci-conf.com.ua**


## ДОДАТОК Г



СТУДЕНТСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

# UNI VER SUM

ISSN 2786-863X

**СЕРТИФІКАТ**  
ПРО ПУБЛІКАШО СТАТТІ

JC 24/11/004

**АВТОР**

МАРТИНЮК КАТЕРИНА ВЛАДИСЛАВІВНА

**НАЗВА СТАТТІ**ЕФЕКТИВНІСТЬ ІННОВАЦІЙНИХ БІОЛОГІЧНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ У ОЧИЩЕННІ СІЧНИХ ВОД**ВИПУСК ЖУРНАЛА**

№ 11 / СЕРПЕНЬ 2024

Стаття індексується в Google Scholar

ДИРЕКТОР МОЛОДІЖНОЇ НАУКОВОЇ ЛІГИ  
ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ  
**ІГОР КОРЕНЮК**