

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до проведення практичних занять та організації самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

**«БІОТЕХНОЛОГІЇ В ЗАХИСТІ ДОВКІЛЛЯ»**

*(для здобувачів третього (освітньо-наукового)  
рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання  
зі спеціальності 183 – Технології захисту  
навколишнього середовища)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2024**

Методичні рекомендації до проведення практичних занять та організації самостійної роботи з навчальної дисципліни «Біотехнології в захисті довкілля» (для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : В. О. Юрченко, О. Г. Мельнікова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 45 с.

Укладачі: д-р техн. наук, проф. В. О. Юрченко,  
канд. техн. наук, доц. О. Г. Мельнікова

Рецензент

**Н. О. Телюра**, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної екології міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою інженерної екології міст, протокол № 14 від 29 грудня 2023 р.*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
ЗАНЯТТЯ 1 ЕКОЛОГІЧНІ БІОТЕХНОЛОГІЇ: ІСТОРІЯ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ.....	6
ЗАНЯТТЯ 2 БІОЛОГІЧНІ АГЕНТИ ЕКОЛОГІЧНИХ БІОТЕХНОЛОГІЙ .....	9
ЗАНЯТТЯ 3 ОСНОВНІ МЕТАБОЛІЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЕКОБІОТЕХНОЛОГІЯХ .....	11
ЗАНЯТТЯ 4 БІОФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОСТУ МІКРОБНОЇ КУЛЬТУРИ.....	15
ЗАНЯТТЯ 5 СТЕХІОМЕТРИЧНІ, КІНЕТИЧНІ ТА ФІЗІОЛОГІЧНІ КОНСТАНТИ РОЗВИТКУ МІКРОБНИХ ПОПУЛЯЦІЙ.....	18
ЗАНЯТТЯ 6 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДОЗАХИСНИХ БІОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....	20
ЗАНЯТТЯ 7 КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СКЛАДУ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ НА КІНЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСІВ У ВОДООЧИСНИХ БІОТЕХНОЛОГІЯХ .....	25
ЗАНЯТТЯ 8 РОЗРАХУНКИ В БІОТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПОДІБНИХ ВИКИДІВ .....	32
ТЕМИ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ І ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПІДГОТОВКИ .....	37
Тема 1 ЕКОЛОГІЧНІ БІОТЕХНОЛОГІЇ: ІСТОРІЯ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ .....	37
Тема 2 БІОЛОГІЧНІ АГЕНТИ ЕКОЛОГІЧНИХ БІОТЕХНОЛОГІЙ.....	37
Тема 3 ОСНОВНІ МЕТАБОЛІЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЕКОБІОТЕХНОЛОГІЯХ .....	37
Тема 4 БІОФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОСТУ МІКРОБНОЇ КУЛЬТУРИ .....	38

Тема 5 СТЕХІОМЕТРИЧНІ, КІНЕТИЧНІ ТА ФІЗІОЛОГІЧНІ КОНСТАНТИ РОЗВИТКУ МІКРОБНИХ ПОПУЛЯЦІЙ .....	38
Тема 6 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДОЗАХИСНИХ БІОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....	38
Тема 7 КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СКЛАДУ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ НА КІНЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСІВ У ВОДООЧИСНИХ БІОТЕХНОЛОГІЯХ .....	39
Тема 8 РОЗРАХУНКИ БІОТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПОДІБНИХ ВИКИДІВ .....	39
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	40
ДОДАТКИ.....	41

## ВСТУП

Мета методичних рекомендацій – допомога аспірантам під час підготовки до практичних занять, проведення розрахунків та виконання самостійної роботи з теоретичним й практичним матеріалом згідно з навчальним планом.

У методичних рекомендаціях подано мету, у стислій формі викладено зміст і загальні відомості щодо тем практичних занять; надано питання щодо ключових задач у вирішенні завдань кожної теми, а також посилання на джерела для самостійного вивчення матеріалу. У методичних рекомендаціях наведено необхідні додаткові матеріали для виконання завдань практичних занять та самостійної роботи.

## ЗАНЯТТЯ 1

### ЕКОЛОГІЧНІ БІОТЕХНОЛОГІЇ: ІСТОРІЯ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ

**Мета заняття** – вивчення історії розвитку біотехнологій та основних її галузей.

**Зміст заняття** – ознайомлення з об'єктами та методами досліджень у сфері розробки природозахисних біотехнологій.

**Загальні відомості.** Біотехнологія належить до міждисциплінарних галузей. Вона виникла на базі біологічних, хімічних і технічних наук. Увібравши результати досліджень названих вище наук, біотехнологія стала символом розвитку суспільства. У прикладному значенні «біотехнологію» розуміють як сукупність промислових методів, де використано живі організми, клітини, тканини, продукти їхнього метаболізму, а також біологічні процеси для виробництва цінних для національної економіки продуктів.

Історія біотехнології налічує тисячоліття (хлібопечення, виноробство, сироробство тощо). Однак щорічно з'являються нові прикладні напрямки біотехнології, загальним підходом для яких є штучне створення умов для еволюційних, біогеохімічних процесів на Землі у вигляді характерних біореакторів, що реалізуються з великими швидкостями, залишаючись сумісними за своїми продуктами з навколишнім середовищем.

Біотехнологія як екологічно спрямована наукова галузь відкриває перед людським розумом нові обрії, перспективи використання сучасних наукових досліджень і цінних для людини та суспільства розробок. Все більша увага приділяється використанню біотехнологічних методів у практиці збереження та відтворення природних ресурсів, а також розробці природоохоронних технологій, до яких потрібно віднести біологічне очищення стічних вод, повітря, біовідновлення ґрунтів, знешкодження токсичних речовин тощо.

Використання біотехнологічних методів у природоохоронних заходах дозволяє знешкоджувати різні забруднювачі, перетворюючи їх на менш

агресивні для довкілля компоненти. Упровадження біотехнологій дає можливість випускати екологічно безпечну продукцію завдяки максимальному використанню відходів виробництва з додатковим отриманням енергетичних ресурсів, біодобрих тощо. Завдяки біотехнологіям можна підвищити рівень екологічної безпеки окремих технологічних процесів у багатьох галузях національної економіки. Таким чином, людство пов'язує свої науково-технічні пріоритети, стратегію розвитку й соціальну політику саме з біологічними технологіями. Вивчення аспектів їхнього застосування допоможе ефективно вирішувати проблеми охорони навколишнього середовища та раціонального природокористування.

Біотехнологія знайшла широке застосування в охороні навколишнього середовища, зокрема для вирішення таких прикладних питань:

- утилізація твердої фази стічних вод та твердих побутових відходів за допомогою анаеробного зброджування;
- біологічне очищення природних та стічних вод від органічних та неорганічних сполук;
- мікробне відновлення забруднених ґрунтів, одержання мікроорганізмів, здатних нейтралізувати важкі метали в осадах стічних вод;
- компостування (біологічне окиснення) відходів рослинності (опад листя, соломи та ін.);
- створення біологічно активного сорбуючого матеріалу для очищення забрудненого повітря.

Загальна схема методів біотехнологічного виробництва подана на рисунку 1.1.

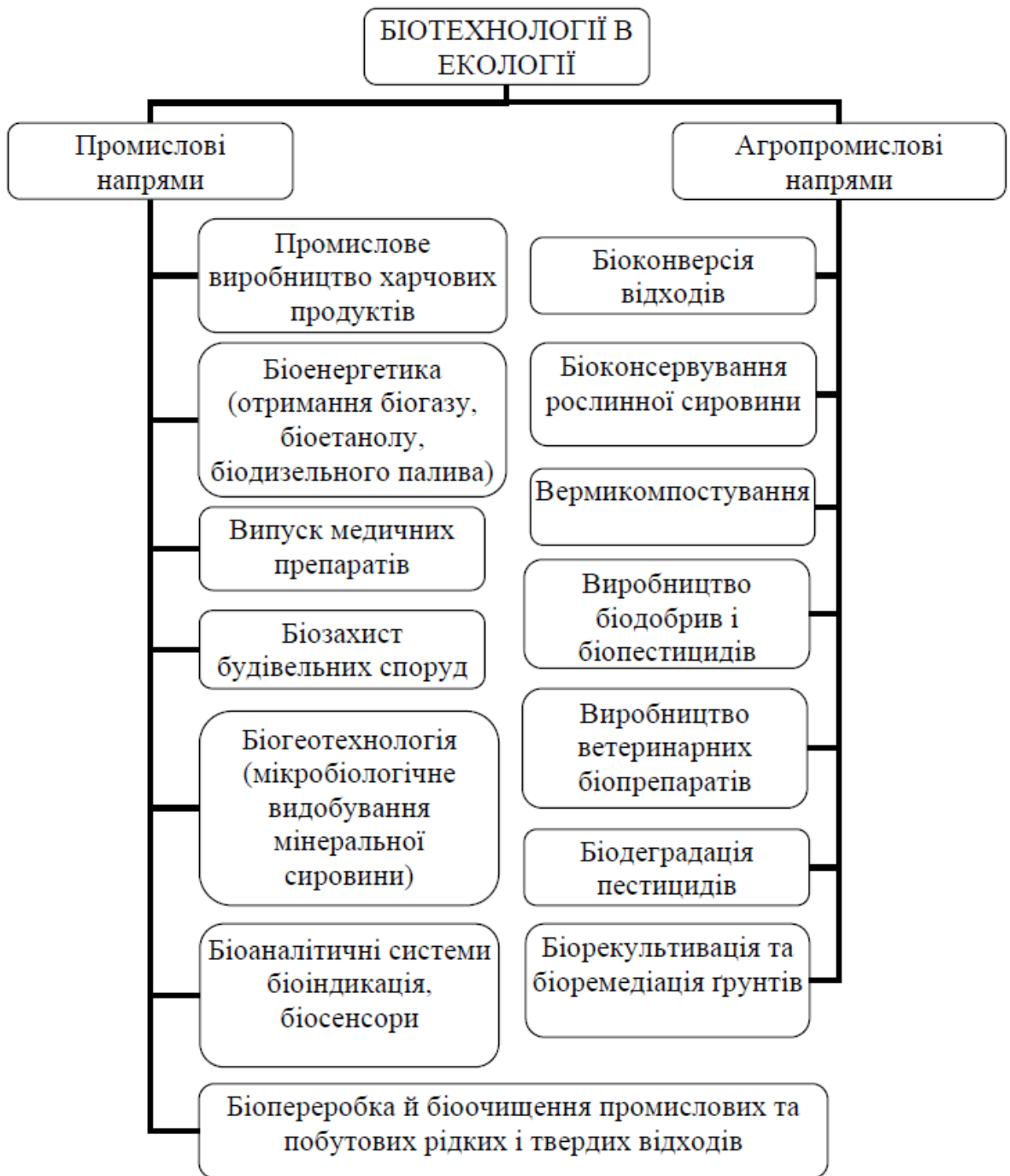


Рисунок 1.1 – Схема комплексу методів біотехнологічного виробництва та їхнього взаємозв'язку



## ЗАНЯТТЯ 2

### БІОЛОГІЧНІ АГЕНТИ ЕКОЛОГІЧНИХ БІОТЕХНОЛОГІЙ

**Мета заняття** – вивчення основних представників біоти, що використовуються в природозахисних біотехнологіях як біологічні агенти.

**Зміст заняття** – ознайомлення з особливостями будови та метаболічної активності прокариотичних та еукаріотичних організмів, що використовуються в природозахисних біотехнологіях.

**Загальні відомості.** Основними елементами, що складають біотехнологічні процеси: біологічний агент, субстрат, апаратура, технологічний режим і продукт. У біотехнологічних процесах можливе використання різних біологічних агентів із різноманітним рівнем організації – від клітинної до молекулярної. Абзаци мають бути однакові

Як біологічний агент у біотехнологіях використовують:

- мікроорганізми;
- віруси;
- мікробні асоціації та консорціуми;
- ферменти;
- рослини;
- мікроводорості.

У сучасному біотехнологічному виробництві серед відомих біооб'єктів домінують мікробні клітини прокариотів й еукаріотів. Мікроорганізми як об'єкти біотехнології належать до трьох надцарств: без'ядерні (акаріоти), доядерні (прокаріоти), ядерні (еукаріоти), та п'яти царств: віруси, бактерії (еубактерії, ціанобактерії, архебактерії), рослини, тварини, гриби.

У біотехнологічних процесах найчастіше використовують бактерії, найпростіші, мікроскопічні водорості, гриби, віруси, бактеріофаги. Світ мікроорганізмів характеризується великою різноманітністю форм, яким властиві малі розміри, що становлять від десятих часток до десятків, сотень мікрометрів. Більшість із них одноклітинні, але зустрічаються й багатоклітинні,

у яких відсутня диференціація на органи й тканини. Природне середовище існування мікроорганізмів – це ґрунт, вода, повітря та організми людини, тварин, рослин.

Панівна роль мікроорганізмів як біологічних агентів у біотехнології забезпечується завдяки таким властивостям:

- малі розміри (морфологічні особливості);
- активність (висока швидкість росту на живильних середовищах);
- простота геному;
- «гнучкість» обміну речовин;
- добра адаптаційна здатність до умов зовнішнього середовища.

### **Властивості основних біологічних агентів природозахисних біотехнологій**

Прокаріоти – це доядерні одноклітинні організми, які не мають сформованого ядра, оскільки в них ядерний матеріал не відділений від цитоплазми ядерною оболонкою. До прокариотичних організмів відносяться бактерії та ціанобактерії (синьо-зелені водорості).

Більшість видів бактерій належать до гетеротрофів (точніше до хемоорганогетеротрофів), тобто вони живляться готовими органічними речовинами, розкладаючи їх на більш прості, й одержують при цьому енергію для свого існування. Невелика кількість видів бактерій відносяться до автотрофів (хемолітоавтотрофів), використовують енергію, що утворюється внаслідок окиснення мінеральних речовин, та  $\text{CO}_2$  як джерела карбону.

Одні групи бактерій – аероби – вимагають для свого існування обов'язкову наявність кисню, інші – анаероби – розвиваються без нього, причому кисень для них шкідливий.

Еукаріотичні організми мають клітини із сформованим ядром та високоорганізованими органелами). До мікроорганізмів-еукаріотів відносяться одноклітинні та багатоклітинні організми, зокрема найпростіші, гриби, водорості (крім синьо-зелених). Найпростіші (Protozoa) – це мікроскопічні одноклітинні тварини надцарства еукаріотів (Eucariotae), які проживають у

воді, ґрунті або паразитують. Підцарство включає п'ять типів: саркодові, джгутикові, споровики, інфузорії, конідоспоридії. Класифікація найпростіших базується на способах їхнього переміщення: за допомогою псевдоподій (псевдоніжок) це роблять амеба, форамініфери, радіолярії; джгутиків – евглена зелена, лямблій, трипаносома; чи війок – інфузорія-туфелька, сувойки.

Найпростіші входять до складу ґрунтових біоценозів, активних мулів біологічних очисних споруд (зооглею). В активному мулі найпростіші виконують функції підтримання певної кількості мікроорганізмів. Живлячись бактеріями та плаваючими речовинами, вони також сприяють освітленню води. Ці організми можна використовувати як тест-індикатори якості очищення стічних вод. У технологічному процесі очищення стічних вод особливе значення має фізіологічний стан війкових інфузорій.

### ЗАНЯТТЯ 3

#### ОСНОВНІ МЕТАБОЛІЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЕКОБІОТЕХНОЛОГІЯХ

**Мета заняття** – вивчення основних понять та уявлень у сфері метаболізму бактерій.

**Зміст заняття** – ознайомлення з основними катаболічними та анаболічними шляхами перетворення субстратів, які використовуються в біотехнологіях.

**Загальні відомості.** Сукупність усіх біохімічних перетворень у клітині називається метаболізмом. Він відбувається за двома основними напрямками. Перший забезпечує синтез складних клітинних сполук із більш простих. Тому він одержав назву біосинтез, конструктивний метаболізм або анаболізм. Переважна більшість реакцій синтезу потребує енергетичного забезпечення. Енергетичний метаболізм або катаболізм становить потік реакцій, які супроводжуються накопиченням електрохімічної енергії, що потім використовується клітиною (рис. 3.1).

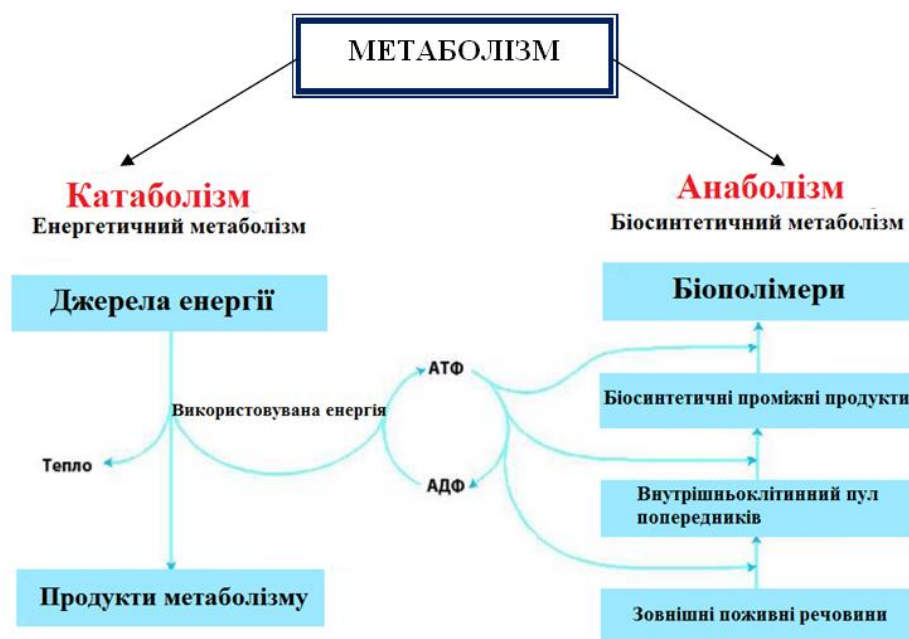


Рисунок 3.1 – Схема обміну речовин

Метаболічні цикли мікробів надзвичайно різноманітні.

### Конструктивний метаболізм прокаріотів

У конструктивному метаболізмі основна роль належить карбону, оскільки всі сполуки, з яких побудовано живі організми, – це сполуки карбону. Їх відомо близько мільйона. Прокаріоти здатні діяти на будь-яку відому карбонову сполуку, тобто використовувати її в своєму метаболізмі. Залежно від джерела карбону для конструктивного метаболізму всі прокаріоти поділяються на дві групи: автотрофи і гетеротрофи. Автотрофи (autos – сам, trophe – живлення) здатні синтезувати всі необхідні їм органічні сполуки з  $\text{CO}_2$  як єдиного джерела карбону. Гетеротрофи (heteros – інший) – мікроорганізми, джерелом карбону для яких є готові органічні сполуки. Вони здатні споживати будь-які прості й складні карбонові сполуки – цукри, амінокислоти, багатоатомні спирти, парафіни та ін.

Бактерії зазвичай засвоюють нітроген у відновленій формі – це солі амонію, сечовини, органічні сполуки (амінокислоти, пептиди). Однак окислені форми азотистих сполук (нітрати) також можуть бути засвоєні мікробами.

## Джерела енергії та донори електронів

Залежно від джерела енергії, що засвоюють мікробні клітини, їх поділяють на фототрофи і хемотрофи.

Мікроорганізми, для яких джерелом електронів є неорганічні сполуки  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3^+$ ,  $Fe^{+2}$  та інші, називаються літотрофами (litos – камінь). Інші бактерії, для яких донором електронів виступають органічні речовини, називаються органотрофами.

Залежно від способу одержання енергії, донора електронів та джерела вуглецю для засвоєння можна виділити 8 основних типів прокаріотичних організмів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Способи існування прокаріотів

Джерело енергії	Донор електронів	Джерело карбону	Спосіб існування	Представники прокаріот
<b>Окисно-відновлювальні реакції</b>	Неорганічні сполуки ( $H_2$ , $H_2S$ , $NH_3$ , $Fe^{2+}$ та ін.)	$CO_2$	Хемолітоавтотрофія	Нітрифікуючі, тіонові, водневі бактерії; ацидофільні залізобактерії
		Органічні сполуки	Хемолітогетеротрофія	Метаноутворюючі архебактерії, водневі бактерії
	Органічні сполуки	$CO_2$	Хемоорганавтотрофія	Факультативні метилотрофи, які окислюють мурашину кислоту
		Органічні сполуки	Хемоорганогетеротрофія	Більшість прокаріот*
<b>Світло</b>	Неорганічні сполуки ( $H_2O$ , $H_2S$ , $S^0$ та ін.)	$CO_2$	Фотолітоавтотрофія	Ціанобактерії, пурпурні та зелені бактерії**
		Органічні сполуки	Фотолітогетеротрофія	Деякі ціанобактерії, пурпурні та зелені бактерії
	Органічні сполуки	$CO_2$	Фотоорганавтотрофія	Деякі пурпурні бактерії
		Органічні сполуки	Фотоорганогетеротрофія	Пурпурні та деякі зелені бактерії, галобактерії, деякі ціанобактерії

\* Усі тварини, гриби.

\*\* Вищі рослини.

Усі біосинтетичні процеси та інші метаболічні перетворення в клітині відбуваються за участю особливих високоактивних біологічних каталізаторів, які називаються ферментами. Вони належать до 6 класів: гідролази (забезпечують реакції розщеплення за участю води), оксидоредуктази (каталізують різноманітні окисно-відновні реакції, беруть участь у процесах дихання), ізомерази (здійснюють процеси ізомеризації), трансферази (переносять групи з одних субстратів на інші), ліази (каталізують реакції відщеплення хімічних груп негідролітичним шляхом), лігази (відповідають за синтез нових речовин, який відбувається завдяки енергії АТФ).

### **Катаболізм вуглеводів**

Прокаріоти розщеплюють глюкозу та інші гексози до піровиноградної кислоти, яка є одним із найважливіших продуктів обміну, трьома шляхами: гліколіз, пентозофосфатний шлях та КДФГ шлях.

Таким чином, у результаті окислення вуглеводів описаними трьома шляхами утворюється піровиноградна кислота, яка за участю кофакторів перетворюється в ацетил-коензим А (вітамін В<sub>5</sub>), а останній вступає у послідовний ланцюг біохімічних реакцій циклу трикарбонових кислот (ЦТК). Важливе значення ЦТК полягає в тому, що в ньому повністю завершується окислення поживних речовин. Крім того, бактеріальна клітина забезпечується попередниками для синтезу амінокислот, ліпідів тощо.

### **Енергетичний метаболізм прокаріотів**

Протягом своєї еволюції бактерії виробили три способи одержання енергії: бродіння, дихання і фотосинтез.

Дихання бактерій – один із шляхів біологічного окислення в аеробних умовах, який відбувається з утворенням молекул АТФ. Процес клітинного дихання можна розділити на три послідовних реакції: гліколіз, цикл лимонної кислоти (ЦТК), ланцюг переносу електронів (ЦПЕ). Кількість АТФ, синтезованої при розщепленні глюкози під час дихання становить 38 молекул

на кожну молекулу глюкози. Під час цього процесу одні речовини (органічні та неорганічні сполуки) слугують донорами електронів і при цьому окислюються, акцепторами електронів виступають неорганічні сполуки, вони відновлюються.

Дихальний ланцюг складається з оксидоредуктаз (рис. 3.2) – дегідрогеназ, флавопротеїдів, убіхінона, цитохромів і білків, що містять залізо й сірку, які послідовно передають один одному електрони.

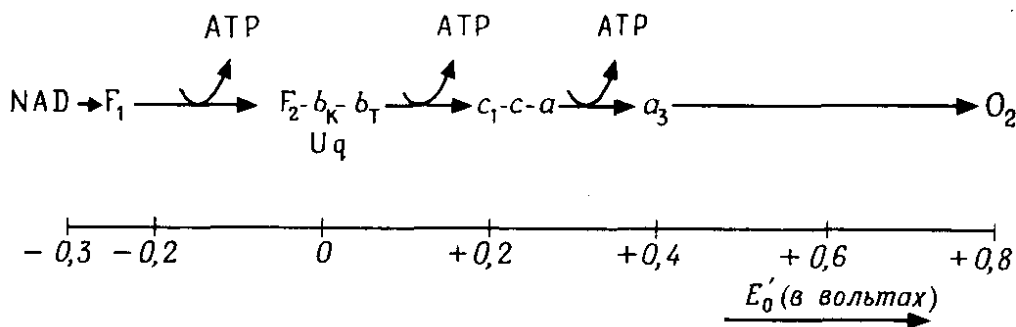


Рисунок 3.2 – Схема дихального ланцюга

Завдяки цьому велика різниця ОВП (1,13 В) дробиться, так само як і вивільнювана енергія.

Субстратне фосфорилування (бродиння) – це такий процес одержання енергії, за якого продукти розщеплення органічного субстрату є одночасно і донорами, і акцепторами електронів (атомів водню). Бродіння характерне для облигатних і факультативних анаеробів.

## ЗАНЯТТЯ 4

### БІОФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОСТУ МІКРОБНОЇ КУЛЬТУРИ

**Мета заняття** – вивчення біофізичних характеристик росту мікробної культури.

**Зміст заняття** – ознайомлення з основними показниками росту мікробної культури.

**Загальні відомості.** Під урожаєм клітин ( $X$ ) розуміють різницю між максимальною і початковою біомасою:

$$X = X_{\max} - X_0. \quad (4.1)$$

Цю величину виражають у вагових одиницях, частіше – у грамах. Особливо важливе відношення урожаю клітин до кількості спожитого субстрату ( $X/S$ ). Якщо обидві ці величини виражають у вагових одиницях, то відношення  $X/S$ , що називають економічним коефіцієнтом, позначають через  $Y$ :

$$Y = dX/dS, \quad (4.2)$$

де  $dX$  – збільшення біомаси, що відповідає споживанню субстрату кількістю  $dS$ .

Метаболічний коефіцієнт аналогічний ферментативній активності. Метаболічний коефіцієнт можна виразити також через економічний коефіцієнт ( $Y$ ) і питому швидкість росту ( $\mu$ ) та подати ще в такому вигляді:

$$q = \mu/Y. \quad (4.3)$$

Параметр  $\mu$ , що означає швидкість росту одиниці біомаси ( $1/X$ ) ( $dX/dt$ ), називають питомою швидкістю росту і вимірюють в одиницях, обернених у часі ( $1/t$ ). Цей параметр можна обчислити зважаючи на те, що

$$dX = \mu \cdot Xdt, \quad (4.4)$$

де  $dX/dt$  – швидкість росту;

$X$  – біомаса;

$\mu$  – коефіцієнт пропорційності («питома швидкість росту»).

Виділяють дві особливості емпіричної залежності росту культур мікроорганізмів:

1. Швидкість зміни кількості мікроорганізмів у режимі його росту (в експоненціальній фазі) лінійно пов'язана з концентрацією клітин у системі:

$$\mu N = \frac{dN}{dt}, \quad (4.5)$$

де  $N$  – кількість клітин;

$\mu$  – питома швидкість зростання.

Уявляється, що  $\mu$  не залежить від часу в досліджуваному інтервалі.

Власне, це рівняння в інтегральній формі і є рівнянням експоненціального зростання. Його інтеграція за початкових умов

$t = 0, N = N_0$  приводить до функції



$$N = N_0 \cdot e^{\mu t}. \quad (4.5)$$

2. Було визначено, що здебільшого значення питомої швидкості зростання залежить від концентрації лімітуючого субстрату, і ця залежність може бути подана у формі

$$\mu(S) = \frac{\mu_m \cdot S}{K_S + S}, \quad (4.6)$$

де  $\mu_m$  – гранична максимальна питома швидкість росту;

$K_S$  – параметр, що одержав назву константи Міхаеліса, константи спорідненості субстрату до мікроорганізму.

Між питомою швидкістю зростання  $\mu$  і концентрацією субстрату  $S$  існує гіперболічна залежність (рис. 4.1), що була установлена Моно, і тому рівняння (4.6) одержало назву «рівняння Моно». Ця залежність виразно виявляється під час періодичного процесу культивування.

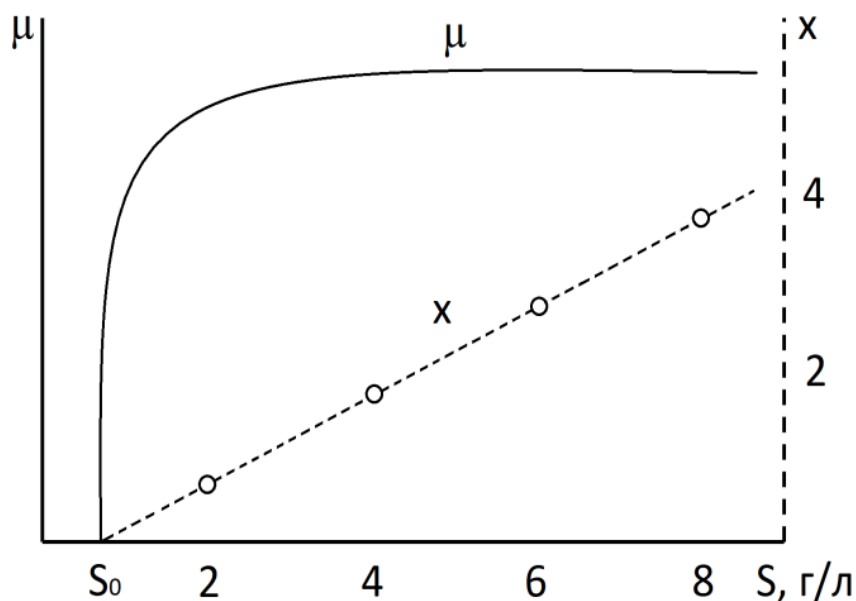


Рисунок 4.1 – Залежність швидкості зростання й урожаю  $x$  від початкової концентрації субстрату (за Г. Шлегелем, 1987):  
 $S_0$  – мінімальний поріг концентрації субстрату

## ЗАНЯТТЯ 5

### СТЕХІОМЕТРИЧНІ, КІНЕТИЧНІ ТА ФІЗІОЛОГІЧНІ КОНСТАНТИ РОЗВИТКУ МІКРОБНИХ ПОПУЛЯЦІЙ

**Мета заняття** – вивчення біоконстант розвитку мікробних популяцій.

**Зміст заняття** – ознайомлення з біоконстантами розвитку мікробних популяцій, які використовуються під час розроблення біотехнологічних процесів.

**Загальні відомості.** Виділяють два типи процесів лімітованого росту популяцій. У першому з них живильний субстрат вноситься в систему один раз, і далі він в процесі росту тільки споживається. У біотехнологіях такий процес називають періодичним культивуванням. У другому процесі, що називається безперервним культивуванням, у ході росту популяції субстрат постійно додається в систему, при цьому вилучається надлишок біомаси.

Динаміка популяції в умовах періодичного культивування описується системою рівнянь, відомих як модель Моно:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= X \cdot \frac{r_{\max} \cdot S}{K_S + S} \\ \frac{dS}{dt} &= -\frac{1}{Y} \cdot \frac{dX}{dt} \end{aligned} \quad , \quad (5.1)$$

де  $X$  – концентрація біомаси;

$S$  – концентрація субстрату, що лімітує;

$t$  – час;

$r_{\max}$  – максимальна питома швидкість росту;

$K_S$  – константа напівнасичення, яка дорівнює концентрації субстрату, за якої швидкість процесу дорівнює  $r_{\max}/2$ ;

$Y$  – економічний коефіцієнт.

На практиці часто застосовується також перший інтеграл системи (5.1):

$$X - X_0 = Y(S_0 - S) , \quad (5.2)$$

$Y$  (yield – врожай, англ.) – маса клітин, утворена на одиницю використаного компонента середовища, становить особливо важливий ростовий параметр, який називають економічним коефіцієнтом (або виходом біомаси). Цю величину визначають за рівнянням:

$$Y = \frac{X_i - X_0}{S_0 - S_i}, \quad (5.3)$$

де  $X_i$  – маса (концентрація) сухої речовини клітин в  $i$ -й момент часу (до вступу культури в стаціонарну фазу росту), г/дм<sup>3</sup>;

$X_0$  – маса (концентрація) сухої речовини клітин відразу після інокуляції середовища, г/дм<sup>3</sup>;

$(X_i - X_0)$  – врожай бактеріальної культури (врожай залежить від кількості та природи живильних речовин, що використовуються, а також від умов культивування), г/дм<sup>3</sup>;

$S_0$  – маса (концентрація) поживного субстрату відразу після інокуляції середовища, г/дм<sup>3</sup>;

$S_i$  – маса (концентрація) поживного субстрату в  $i$ -й момент часу (до вступу культури в стаціонарну фазу росту), г/дм<sup>3</sup>;

$(S_0 - S)$  – кількість спожитого субстрату (компоненту середовища), г/дм<sup>3</sup>.

Економічний коефіцієнт чи витрати на підтримку відноситься до стехіометричних, а константа напівнасичення ( $K_S$ ) і максимальна питома швидкість росту ( $r_{\max}$ ) – до кінетичних коефіцієнтів, які широко використовують у математичних моделях біологічних і біотехнологічних процесів.

Для опису лімітованого росту популяції в хемостаті застосовують таку систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= X \cdot \left( \frac{r_{\max} \cdot S}{K_S + S} - D \right) \\ \frac{dS}{dt} &= D \cdot (S_0 - S) - \frac{X}{Y} \cdot \frac{r_{\max} \cdot S}{K_S + S}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

Параметр  $D$  називається протокою, вона чисельно дорівнює швидкості подачі живильного середовища (субстрату) у культиватор (ферментер) –  $Q$ , нормованої на ефективний обсяг культиватора –  $V$ :

$$D = Q / V . \quad (5.5)$$

Розмірність протоки –  $[\text{час}]^{-1}$ . На практиці часто використовують співвідношення, одержувані з аналізу стаціонарного стану хемостата:

$$\bar{r} = D , \bar{S} = \frac{K_S \cdot D}{r_{max} - D} , \bar{X} = Y(S_0 - \bar{S}) . \quad (5.6)$$

Тут  $r_{max}$  – стаціонарна питома швидкість росту популяції,  $\bar{S}$  і  $\bar{X}$  – стаціонарні концентрації субстрату і біомаси.

Стаціонарне значення концентрації біомаси повинне задовольняти співвідношенню

$$\bar{X} = YS_0 + X_0 . \quad (5.7)$$

## ЗАНЯТТЯ 6

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДОЗАХИСНИХ БІОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Мета заняття** – вивчення окремих математичних моделей природозахисних біотехнологій.

**Зміст заняття** – ознайомлення з методами розрахунку біокінетичних констант, необхідних для реалізації та математичного моделювання біотехнологій.

**Загальні відомості.** Методи математичного моделювання, з одного боку, забезпечують можливість фундаментального дослідження динаміки біологічних процесів з урахуванням всієї сукупності ефектів (зокрема екологічних факторів і поллютантов екзогенного походження), які ускладнюють зростання популяції, з іншого – дозволяють вести обґрунтований

пошук технологічних режимів, тонкого управління процесом зростання популяцій в біотехнологіях.

Математичні моделі як природних біологічних процесів, так і біотехнологій, ґрунтуються на біологічних уявленнях про кінетичні властивості процесів (швидкостях росту, розмноження, загибелі, інтенсивності взаємодії).

### Приклади для розрахунку біокінетичних констант

З метою визначення економічного коефіцієнта  $Y$ , що характеризує ріст популяції біологічного агенту бактерії *Pseudomonas spp.* (бідеструктора багатьох забруднюючих речовин стічних вод), проводили періодичне культивування *Pseudomonas spp.* на водному мінеральному середовищі з лімітуванням по глюкозі до виходу популяції в стаціонарну фазу. У ході експерименту вимірювали концентрацію біомаси бактерій і концентрацію глюкози. Результати вимірів подані в таблиці 6.1.

Подати графічно динаміку концентрацій біомаси і глюкози в середовищі і визначити за поданими даними значення економічного коефіцієнта  $Y$ , а також стаціонарне значення концентрації біомаси  $\bar{X}$ , що характеризують ріст популяції *Pseudomonas spp.* на глюкозі. Розрахувати питому швидкість росту біомаси популяції  $r$  і питому швидкість перетворення живильного субстрату  $\rho$ .

Таблиця 6.1 – Експериментальні дані періодичного культивування популяції *Pseudomonas spp.*

Час, t год	Концентрація біомаси, X мг/дм <sup>3</sup>	Концентрація глюкози, S мг/дм <sup>3</sup>
1	2	3
0	20	2 000
0,5	30,52	1 976
1,0	46,6	1 940
1,5	71,1	1 886
2,0	108,5	1 803

Продовження таблиці 6.1

1	2	3
2,5	165,5	1 676
3,0	252,5	1 483
3,5	385	1 188
4,0	587	740
4,33	773	326
4,5	885	77
4,56	918	4,4
4,564	919	2,2
5,0	920	0
5,5	920	0

Динаміку біомаси популяції *Pseudomonas* spp. при періодичному культивуванні на середовищі з глюкозою можна подати графічно.

Для визначення економічного коефіцієнта використовуємо рівняння

$$X - X_0 = Y(S_0 - S). \quad (6.1)$$

Розрахуємо допоміжні змінні  $X - X_0$  і  $S_0 - S$ .

Далі побудуємо графік у цих допоміжних координатах, використовуючи дані з 4 і 5 стовпців таблиці 6.2. Тангенс кута нахилу регресійної прямої, проведеної через експериментальні точки, дає значення економічного коефіцієнта:  $Y = 0,45$  г біомаси на г глюкози. Визначити  $Y$  можна також при усередненні даних 6 стовпця таблиці 6.2. Перевіримо відповідність цього значення економічного коефіцієнта експериментальним даним. Відповідно до теорії стаціонарне значення концентрації біомаси  $\bar{X}$  повинне задовольняти співвідношенню  $\bar{X} = YS_0 + X_0$ . Використовуючи ці таблиці 6.1, одержимо:  $\bar{X} = 920$  мг/дм<sup>3</sup>,  $X_0 = 20$  мг/дм<sup>3</sup>,  $S_0 = 2\ 000$  мг/дм<sup>3</sup>, звідси  $YS_0 + X_0 = 0,45 \times 2\ 000 + 20 = 920$  мг/дм<sup>3</sup>. Відповідність у наявності.

Таблиця 6.2 – Розрахунок допоміжних змінних для визначення Y, r і ρ

Час, t год	Концентрація біомаси (X), мг/дм <sup>3</sup>	Концентрація глюкози (S), мг/дм <sup>3</sup>	S <sub>0</sub> - S	X - X <sub>0</sub>	$\frac{X - X_0}{S_0 - S}$	X <sub>i+1</sub> - X <sub>i</sub>	$r = \frac{X_{i+1} - X_i}{(t_{i+1} - t_i) \cdot X_i}$	S <sub>i</sub> - S <sub>i+1</sub>	$\rho = \frac{S_i - S_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i) \cdot X_i}$
0	20	2 000	0	0	–	–	–	–	–
0,5	30,52	1 976	23,4	10,5	0,45	10,5	1,05	23,4	2,34
1,0	46,6	1 940	59,1	26,6	0,45	16,1	1,06	36,0	2,36
1,5	71,1	1 886	113,5	51,1	0,45	24,5	1,05	54,0	2,35
2,0	108,5	1 803	196,6	88	0,45	37,4	1,05	83,0	2,33
2,5	165,5	1 676	323,3	145	0,45	57,0	1,05	127,0	2,34
3,0	252,5	1 483	516,6	232	0,45	87,0	1,03	193,0	2,33
3,5	385	1 188	811,1	365	0,45	132,5	1,04	295,0	2,33
4,0	587	740	1 260	567	0,45	202,0	1,05	448,0	2,16
4,33	773	326	1 673	753	0,45	186,0	0,96	414,0	2,13
4,5	885	77	1 922	865	0,45	112,0	0,85	249,0	1,89
4,56	918	4,4	1 995	898	0,45	33,0	0,62	72,6	1,37
4,564	919	2,2	1 997	899	0,45	1,0	0,18	2,2	0,60
5,0	920	0	2 000	900	0,45	0	0	2,2	0,40
5,5	920	0	2 000	900	0,45	0	0	0	0,01

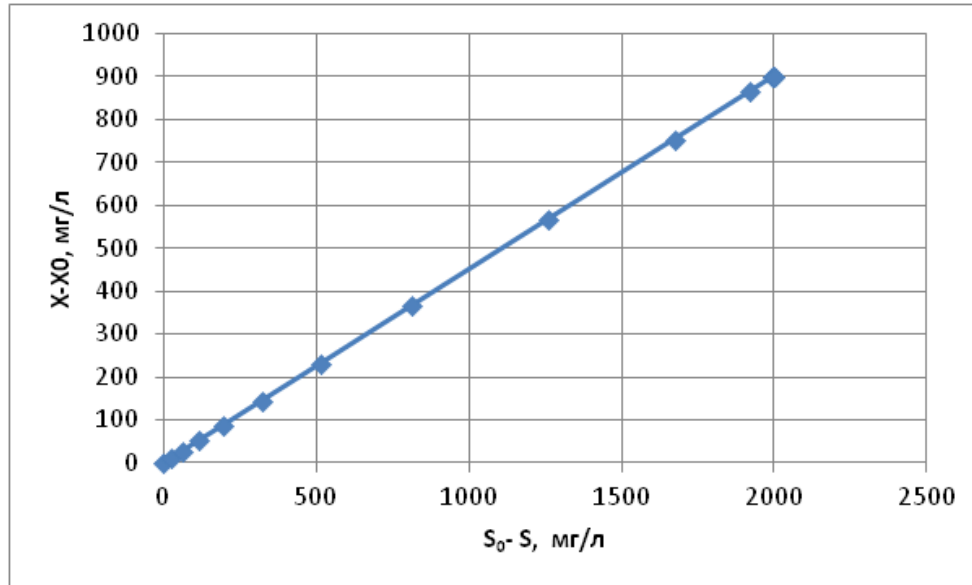


Рисунок 6.1 – Визначення економічного коефіцієнта  $Y$  за даними таблиці 6.2

За експериментальними даними можна розрахувати питому швидкість росту біомаси популяції  $r$ :

$$r = \frac{\Delta X}{\Delta t \cdot X} = \frac{X_{i+1} - X_i}{(t_{i+1} - t_i)X_i} \quad (6.2)$$

і питому швидкість перетворення субстрату  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\Delta S}{\Delta t \cdot X} = \frac{S_i - S_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)X_i} \quad (6.3)$$

Середнє значення питомої швидкості росту біомаси популяції до початку лімітування процесу концентрацією субстрату  $r = 1,05 \text{ год}^{-1}$ , а в цілому по експерименту (значення  $r \geq 0$ )  $0,85 \text{ год}^{-1}$ . Середнє значення питомої швидкості споживання глюкози до початку лімітування процесу концентрацією субстрату  $\rho = 2,34 \text{ мг(мг} \cdot \text{год)}^{-1}$ , а в цілому по експерименту  $\rho = 1,85 \text{ мг(мг} \cdot \text{год)}^{-1}$ .

### **Завдання для самостійної роботи**

Досліджували ріст популяції бактерій в аеробних умовах у водному середовищі з амонійними солями як єдиним джерелом азоту та ріст популяції бактерій в стічних водах. У ході експерименту вимірювали концентрацію біомаси і концентрацію забруднюючих стічні води субстратів – сполук азоту та



органічних забруднень (ХСК). Дані експерименту подано в таблицях А.1, А.2 (дод. А).

Подати графічно динаміку концентрацій біомаси, сполук азоту, ХСК у водному середовищі і визначити за поданими даними значення економічного коефіцієнта  $Y$ , а також стаціонарне значення концентрації біомаси  $\bar{X}$ , що характеризують ріст популяції мікроорганізмів на цьому середовищі. Розрахувати питому швидкість росту біомаси популяції  $r$  і питому швидкість перетворення забруднень (субстрату)  $\rho$ .

## ЗАНЯТТЯ 7

### КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СКЛАДУ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ НА КІНЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСІВ У ВОДООЧИСНИХ БІОТЕХНОЛОГІЯХ

**Мета заняття** – вивчення впливу технологічних параметрів на процеси в біотехнологічних установах.

**Зміст заняття** – ознайомлення з біоконстантами розвитку мікробних популяцій в умовах впливу різних технологічних параметрів.

#### Загальні відомості

До найважливіших характеристик біологічних популяцій відносяться питома швидкість росту популяції  $r$  ( $r = \frac{\Delta X}{\Delta t \cdot X} = \frac{X_{i+1} - X_i}{(t_{i+1} - t_i)X_i}$ ) і питома швидкість перетворення субстрату  $\rho$  ( $\rho = \frac{\Delta S}{\Delta t \cdot X} = \frac{S_i - S_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)X_i}$ ). Ці характеристики залежать від цілого ряду екологічних факторів (кислотності середовища, температури, концентрації біогенних елементів, «важких» металів, кисневого режиму й ін.):

$$r = f(\text{pH}, T^0, O_2, C, N, \text{Cu}, \text{Zn} \dots),$$

$$\rho = f(\text{pH}, T^0, O_2, C, N, \text{Cu}, \text{Zn} \dots).$$

Вплив на  $r$  і  $\rho$  кислотності середовища, температури, кисневого режиму, концентрації біогенних елементів, «важких» металів, кисню враховується за

допомогою мультиплікативних коефіцієнтів ( $K_{pH}$ ,  $K_t$ ,  $K_{O_2}$  та ін.), значення яких може змінюватися від 0 до 1.

$$r = r_{\max} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot K_{O_2} \cdot K_t \cdot K_{pH}, \quad (7.1)$$

$$\rho = \rho_{\max} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot K_{O_2} \cdot K_t \cdot K_{pH}, \quad (7.2)$$

де  $r_{\max}$  і  $\rho_{\max}$  – максимальна питома швидкість росту популяції і максимальна питома швидкість перетворення живильного субстрату відповідно.

### Оцінка впливу рН середовища на розвиток популяцій

Залежність швидкості біохімічних процесів від рН середовища описується колоколоподібною залежністю.  $K_{pHi}$  – коефіцієнт, що враховує вплив рН, можна кількісно оцінити за методом:

$$K_{pHi} = \begin{cases} F(pH_{on} - pH, pH_{on} - K_{IL1_i}, pH_{on} - K_{IL2_i}), & \text{якщо } pH < pH_{on} \\ F(pH - pH_{on}, K_{IH1_i} - pH_{on}, K_{IH2_i} - pH_{on}), & \text{якщо } pH > pH_{on}, \end{cases} \quad (7.3)$$

де  $pH_{on}$  – оптимальне значення рН для конкретного біохімічного процесу;  $K_{IL1_i}$ ,  $K_{IL2_i}$ ,  $K_{IH1_i}$ ,  $K_{IH2_i}$  – константи інгібування біохімічних процесів іонами водню. Константи  $K_{IL1_i}$ ,  $K_{IL2_i}$  описують інгібування в більш кислій області рН, а  $K_{IH1_i}$ ,  $K_{IH2_i}$  – у більш лужної області рН. Константи  $K_{IL1_i}$ ,  $K_{IH1_i}$  чисельно дорівнюють величині рН, за якої швидкість метаболізму знижується вдвічі, а  $K_{IL2_i}$ ,  $K_{IH2_i}$  чисельно дорівнюють величині рН, за якої швидкість метаболізму знижується в 100 разів. Розглянуті значення констант співвідносяться між собою у такий спосіб  $K_{IL2_i} < K_{IL1_i} < K_{IH1_i} < K_{IH2_i}$ . Графік залежності  $K_{pHi}$  має трапецієподібну форму. Причому ширина трапеції визначається константами  $K_{IL1_i}$ ,  $K_{IH1_i}$ , а крутість бічних схилів –  $K_{IL2_i}$ ,  $K_{IH2_i}$ .

$$K_{pHi}(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{1 + (x_1/x_2)^{\ln(99)/\ln(x_3/x_2)}}, \quad (7.4)$$

де  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – аргументи залежності (7.3).

## Оцінка впливу температури на розвиток популяцій

$K_t$  – коефіцієнт, що враховує вплив температури на активність розвитку популяцій, можна кількісно оцінити за рівнянням:

$$K_t = 10^{k_T(T-T_{\text{опт}})}, \quad (7.5)$$

де  $k_T$  – коефіцієнт, рівний для вільнонопливаючої мікрофлори – 0,02, для іммобілізованої мікрофлори – 0,03;

$T$  – температура середовища, °С;

$T_{\text{опт}}$  – оптимальна для процесу температура.

Залежність справедлива при  $T \leq 30$  °С.

## Оцінка впливу «важких» металів на розвиток популяцій. Константа інгібування

У математичних моделях природоохоронних біотехнологій для кількісного опису дії важких металів – інгібіторів використовують константу інгібування. Константа інгібування – концентрація інгібітора («важкого» металу), за якої спостерігається 50 % зниження фізіологічної активності біоти.

Під час розрахунку  $r$  і  $\rho$  інгібування «важкими» металами враховується в такий спосіб:

$$r = r_{\text{max}} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot \left( \frac{K_{\text{Cu}}}{S + K_{\text{Cu}}} \right) \cdot \left( \frac{K_{\text{Pb}}}{S + K_{\text{Pb}}} \right) \cdot \left( \frac{K_{\text{Zn}}}{S + K_{\text{Zn}}} \right) \cdot K_{[\text{O}_2]} \cdot K_t \cdot K_{\text{pH}}, \quad (7.6)$$

$$\rho = \rho_{\text{max}} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot \left( \frac{K_{\text{Cu}}}{S + K_{\text{Cu}}} \right) \cdot \left( \frac{K_{\text{Pb}}}{S + K_{\text{Pb}}} \right) \cdot \left( \frac{K_{\text{Zn}}}{S + K_{\text{Zn}}} \right) \cdot K_{[\text{O}_2]} \cdot K_t \cdot K_{\text{pH}}, \quad (7.7)$$

де  $K_{\text{Cu}}$ ,  $K_{\text{Pb}}$ ,  $K_{\text{Zn}}$  – константи інгібування процесу іонами міді, свинцю, цинку.

## Оцінка впливу кисню на розвиток водних популяцій

Вплив концентрації кисню на аеробні мікробні популяції враховується за рівнянням:

$$r = r_{\text{max}} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot \left( \frac{C_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + C_{\text{O}_2}} \right) \cdot K_t \cdot K_{\text{pH}}, \quad (7.8)$$

де  $C_{\text{O}_2}$  – концентрація кисню в середовищі

$$\rho = \rho_{\max} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot \left( \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \right) \cdot K_t \cdot K_{pH} . \quad (7.9)$$

У цих рівняннях використовується константа напівнасичення  $K_{O_2}$  – концентрація кисню в середовищі, за якої активність процесу дорівнює половині максимальної.

Вплив концентрації кисню на анаеробні мікробні популяції враховується за рівнянням:

$$r = r_{\max} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot \left( \frac{K_{iO_2}}{K_{iO_2} + S} \right) \cdot K_t \cdot K_{pH} , \quad (7.10)$$

$$\rho = \rho_{\max} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot \left( \frac{K_{iO_2}}{K_{iO_2} + S} \right) \cdot K_t \cdot K_{pH} . \quad (7.11)$$

Для опису цих процесів використовується константа інгібування киснем. Прикладом такого процесу є денітрифікація – процес, що використовується в біотехнологіях глибокого очищення стічних вод від сполук азоту й обробці висококонцентрованих за вмістом органічних забруднень і нітратів стічних вод. Під час опису кінетичних показників денітрифікації враховується вплив концентрації нітратів:

$$\rho_{\text{дн}} = \rho_{\text{днmax}} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot \left( \frac{C_{\text{NO}_3}}{K_{m\text{NO}_3} + C_{\text{NO}_3}} \right) \cdot \left( \frac{K_{iO_2}}{K_{iO_2} + S} \right) \cdot K_t \cdot K_{pH} , \quad (7.12)$$

де  $\rho_{\text{дн}}$  – питома швидкість перетворення органічного субстрату при денітрифікації;

$\rho_{\text{дн max}}$  – максимальна питома швидкість перетворення органічного субстрату при денітрифікації;

$C_{\text{NO}_3}$  – концентрація нітратів у середовищі;

$K_{\text{NO}_3}$  – константа напівнасичення нітратами.

### Приклад для розрахунку

Розрахувати ефект зниження питомої швидкості біологічного очищення господарсько-побутових стічних вод (витрата  $Q_{\text{гп}} = 500 \text{ м}^3/\text{діб}$ ) від органічних

забруднень (ХСК) при змішанні з промисловими стічними водами (витрата  $Q_{\text{пр}} = 250 \text{ м}^3/\text{діб}$ ). Відзначити компоненти промислових стічних вод, що найбільше вплинули на зміну питомої швидкості біологічного очищення. Показники господарсько-побутових стічних вод: ХСК –  $260 \text{ мг/дм}^3$ , рН – 7,2; температура  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; «важкі» метали відсутні. Основні значення кінетичних і фізіологічних констант для різних мікробіоценозів подано в таблиці 7.1.

Показники промислових стічних вод: ХСК – 0; рН – 5,9; температура  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ , концентрація іонів «важких» металів  $\text{Cu} - 2,5$ ,  $\text{Zn} - 0,8$ ,  $\text{Ni} - 4,0 \text{ мг/дм}^3$ . Після змішання стічних вод рН устанавлюється на рівні 6,4; температура мулової суміші в споруді  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Концентрація кисню під час оброблення господарсько-побутових стічних вод в аеротенку дорівнює  $2,4 \text{ мг/дм}^3$ , під час оброблення суміші стічних вод концентрація кисню дорівнює  $2,7 \text{ мг/дм}^3$ .

Біокінетичні характеристики активного мулу біологічної очисної споруди наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Значення кінетичних і фізіологічних констант для різних мікробіоценозів

Константи	Біоценоз			
	Аеробний			Анаеробний
	Активний мул, що окиснює органічні речовини – ХСК	Активний мул нітрифікуючий (що окиснює $\text{NH}_4^+$ )	Метан окиснюючий	Активний мул денітрифікуючий (відновлюючий $\text{NO}_3^-$ )
$K\hat{I}_2$ – константа напівнасичення киснем – концентрація кисню в середовищі, за якої активність процесу дорівнює половині максимальної, мг/дм <sup>3</sup>	0,2	0,8	–	–
$K_S$ – константа напівнасичення субстратом – концентрації субстрату, за якої активність процесу дорівнює половині максимальної, мг/дм <sup>3</sup>	20,0 (10 по БСК)	1,5	12	1,5 – по $\text{NO}_3^-$ 12 – по ХПК
$K_i\hat{I}_2$ – константа інгібування – концентрація кисню в середовищі, за якої активність процесу знижується вдвічі порівняно з максимальною, мг/дм <sup>3</sup>	–	–	–	0,6
рН оптимальний $K_{IL1_i}, K_{IL2_i}, K_{II1_i}, K_{II2_i}$	7,2 6,0; 3,0; 8,2; 9,2	8,0 5,8; 4,8; 9,7; 10,0	–	7,5 6,5; 3,5; 8,5; 9,6
T – оптимальна для процесу температури, °C	22	24	–	25
$K_{Cu}, K_{Cr}, K_{Zn}, K_{Ni}$ – константи інгібування процесу іонами міді, хрому, цинку, нікелю, мг/дм <sup>3</sup>	1,1; 7,5; 2,6; 4,6	0,3; 4,5; 1,6; 2,6	–	1,1; 7,5; 2,6; 4,6
$K_{ХПК}, K_{неф}$ – константи інгібування нітрифікації органічними речовинами (ХСК) і нафтопродуктами, мг/дм <sup>3</sup>	–	4,0 3,0	–	–
$\rho_{max}$ – максимальна питома швидкість перетворення субстрату, мг(г · год) <sup>-1</sup>	140 (100 по БСК)	50	–	102 (ХСК)
$\Gamma_{max}$ – максимальна питома швидкість росту популяції, діб <sup>-1</sup>	3,0	0,8	1,4	5,0

Розрахуємо питому швидкість окиснення ХСК господарсько-побутових стічних вод ( $\rho_{Г-П}$ ) за формулою (7.7):

$$\rho_{x-n} = \rho_{x-n \max} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot K_{O_2} \cdot K_t \cdot K_{pH} = \rho_{x-n \max} \left( \frac{ХПК}{K_m + ХПК} \right) \cdot \left( \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \right) \cdot 10^{k_T(T-T_{opt})} \times$$

$$\times \frac{1}{1 + (x_1 / x_2)^{\ln(99)/\ln(x_3 / x_2)}} \quad (7.13)$$

$k_T$  – для активного мулу – 0,02.

$$\rho_{x-n} = 140 \cdot \frac{260}{20 + 260} \cdot \frac{2,4}{0,2 + 2,4} \cdot 10^{0,02(25-22)} \cdot \frac{1}{1 + (0/1,2)^{4,6/\ln(4,2/1,2)}} = 136,4 \text{ мг ХПК} (\text{г} \cdot \text{год})^{-1}$$

Розрахуємо значення ХСК стічних вод після змішання (ХСК<sub>3</sub>). Розведення господарсько-побутових стічних вод розрахуємо за витратами.

Витрата стічних вод після змішання ( $Q_{\text{сум}}$ ) дорівнює  $Q_{\text{гл}} + Q_{\text{пр}} = 500 + 250 = 750 \text{ м}^3/\text{доб}$ . Розведення дорівнює  $Q_{\text{сум}}$ :  $Q_{\text{Г-П}} = 750 : 500 = 1,25$ . Зниження ХСК при розведенні дорівнює 1,25. Звідси  $ХПК_{\text{зм}} = ХПК_{\text{Г-П}} : 1,25 = 260 : 1,25 = 208 \text{ мг/дм}^3$ .

Розрахуємо концентрації іонів «важких» металів у стічних водах після змішання. Розведення промислових стічних вод дорівнює  $Q_{\text{сум}}$ :  $Q_{\text{пр}} = 750 : 250 = 3$ . Концентрації іонів «важких» металів рівні:  $\text{Cu} - 2,5 : 3 = 0,83$ ;  $\text{Zn} - 0,80 : 3 = 0,27$ ;  $\text{Ni} - 4,0 : 3 = 1,3 \text{ мг/дм}^3$ .

Розрахуємо питому швидкість окислювання органічних сполук (ХСК) у суміші господарсько-побутових і промислових стічних вод ( $\rho_{\text{сум}}$ ) за формулою (7.7):

$$\rho_{\text{сум}} = \rho_{x-n \max} \left( \frac{ХПК_c}{K_m + ХПК_c} \right) \cdot \left( \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \right) \cdot 10^{k_T(T-T_{opt})} \cdot \frac{1}{1 + (x_1 / x_2)^{\ln(99)/\ln(x_3 / x_2)}} \times$$

$$\times K_{\text{Cu}} \cdot K_{\text{Zn}} \cdot K_{\text{Ni}} = 140 \cdot \frac{208}{20 + 208} \cdot \frac{2,7}{0,2 + 2,7} \cdot 10^{0,02(20-22)} \cdot \frac{1}{1 + (0,8/1,2)^{4,6/\ln(4,2/1,2)}} \times$$

$$\times \frac{1,1}{1,1 + 0,83} \cdot \frac{2,6}{2,6 + 2,0} \cdot \frac{4,6}{4,6 + 1,33} = 36,2 \text{ мг ХПК} (\text{г} \cdot \text{год})^{-1}$$

Ефект зниження швидкості очищення господарсько-побутових стічних вод від органічних забруднень (ХСК) при змішанні з промисловими стічними водами ( $E_{\text{зниж}}$ ) обчислюємо за формулою:

$$E_{\text{зниж}} = \frac{(\rho_{\text{Г-П}} - \rho_{\text{СУМ}}) \cdot 100}{\rho_{\text{Г-П}}} . \quad (7.14)$$

Він дорівнює  $E_{\text{зниж}} = \frac{(136,4 - 36,2)}{136,4} \cdot 100 = 73,5\%$ . Найбільший внесок у зниження питомої швидкості біологічного окиснення (за ХСК) після змішання господарсько-побутових стічних вод із промисловими внесли іони важких металів (мідь, нікель) і зниження рН.

### **Завдання для самостійної роботи**

Розрахувати за значеннями питомої швидкості біологічного окиснення ХСК, за яких умов утворену промислову стічну воду, що містить нітрати, доцільно очищати від органічних сполук в аеробних умовах, а за яких – в анаеробних умовах шляхом денітрифікації. Варіанти вихідних даних подано в таблиці Б.1 (дод. Б).

## **ЗАНЯТТЯ 8**

### **РОЗРАХУНКИ В БІОТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПОДІБНИХ ВИКИДІВ**

**Мета заняття** – вивчення математичної моделі біотехнології очищення викидів від метану.

**Зміст заняття** – ознайомлення з біоконстантами розвитку метаноокиснюючих мікробних популяцій, які використовуються під час розроблення біотехнологічних процесів.



## Загальні відомості

Зараз для біологічного очищення повітря використовується три основних типи установок: біофільтри, біоскрубери і біореактори з омиваним шаром. Газоподібні сполуки, що підлягають очищенню, проходячи через шар біокатализатора в установках усіх трьох типів, адсорбуються водним середовищем (плівковою вологою, аерозолем), а потім піддаються мікробіологічній деструкції.

З метою зниження метановиділення з вироблених просторів за допомогою метанотрофних бактерій було запропоновано іммобілізувати (закріпити) ці мікроорганізми на поверхні гірських порід у цих просторах. Якщо на шляху руху метану з вироблених просторів створити біофільтр за допомогою нанесення на гірські породи суспензії метанотрофів, то ці мікроорганізми протягом доби можуть окислити до 1 200 м<sup>3</sup> метану, що зробить істотний внесок у зниження метановиділення на вуглевидобувній ділянці.

Для розрахунку концентрації метану в процесі мікробіологічного окиснення (за  $\mu_m = \text{const}$ ) автори цієї біотехнології пропонують таку формулу:

$$S_m(t) = X_{0,m} \left[ S_{y,m} - \frac{1}{Y_m} (e^{\mu_m t} - 1) \right], \quad (8.1)$$

де  $S_m(t)$  – концентрація метану у визначений момент часу, г/дм<sup>3</sup>;

$X_{0,m}$  – вихідна концентрація метанокиснюючої біомаси, г/дм<sup>3</sup>;

$\mu_m$  – питома швидкість росту метанокиснюючої біомаси, год<sup>-1</sup>;

$t$  – тривалість обробки, год;

$Y_m$  – економічний коефіцієнт споживання метану, мг/мг;

$S_{y,m}$  – питома концентрація метану, оптимальна для росту мікроорганізмів, визначається за формулою (28):

$$S_{y,m} = \frac{S_{0,m}(t)}{X_{0,m}(t)}, \quad (8.2)$$

де  $S_{0,m}(t)$  – концентрація метану в початковий момент часу, г/дм<sup>3</sup>;

$Y_M$  – економічний коефіцієнт споживання метану, const, мг/мг, (при зольності біомаси 17 %)  $Y_M = 0,76$  г сухої речовини біомаси /г  $CH_4$ .

Концентрацію метану в газоповітряному середовищі виражають у г/дм<sup>3</sup> або в об'ємних відсотках. Для переведення об'ємних відсотків у г/дм<sup>3</sup> використовуємо закон Авогадро, згідно з яким маса 1 дм<sup>3</sup>  $m_{CH_4}$  дорівнює:

$$m_{CH_4} = \frac{M_B \cdot V_{CH_4}}{22,4} \text{ (г)}, \quad (8.3)$$

де  $M_B$  – молекулярна маса  $CH_4$ , 16;

$V_{CH_4}$  – об'єм газу – 1 дм<sup>3</sup>;

22,4 – об'єм, займаний 1 г-молем  $CH_4$ , дм<sup>3</sup>.

Концентрація метану в газоповітряній суміші (г/дм<sup>3</sup>) дорівнює:

$$S_{M\%} = \frac{S_{M\%} \cdot m_{CH_4}}{100}, \quad (8.4)$$

де  $S_{M\%}$  – вміст  $CH_4$  в суміші, об. %.

Підсумкова формула:

$$S_M = \frac{S_{M\%} \cdot M_B \cdot V}{100 \cdot 22,4} = \frac{S_{M\%} \cdot 0,714}{100} \text{ (г/дм}^3\text{)}, \text{ а } S_{\%} = \frac{S_{M\%} \cdot 100}{0,714} \text{ (об. \%)}. \quad (8.5)$$

При описі питомої швидкості біохімічного окиснення метану ( $\rho_M$ , мг/г · год) увели мультиплікативний коефіцієнт, що враховує вплив на кінетику окиснення метану масообміну кисню

$$\rho_M = \frac{\rho_{\max M} S_M(t)}{S_M(t) + K_{S_M}} k, \quad (8.6)$$

де  $\rho_{\max M}$  – максимальна питома швидкість окиснення метану, мг/г · год;

$K_{S_M}$  – константа напівнасичення, г/дм<sup>3</sup> для метанокиснюючого біоценозу;

$k$  – коефіцієнт інгібування процесу масообміном кисню

$$k = \frac{M}{M + \dot{I}_n}, \quad (8.7)$$

де  $M_n$  – значення масообміну, за якого нагромадження біомаси дорівнює  $\frac{1}{2}$  оптимальної,  $230 \text{ мг/м}^3$ ;

$M$  – установлюваний масообмін,  $\text{мг/м}^3$ .

Біокінетичні константи детоксикації метану біотехнологічним методом наведені в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Стехіометричні, кінетичні, фізіологічні константи та коефіцієнти біотехнологічної детоксикації метану

Показники	Розмірність	Значення
$Y_M$	г/г	0,76
$K_{S_M}$	$\text{мг/дм}^3$	12,0
$\mu_{\max M}$	$\text{дїб}^{-1}$	3,1
$\rho_{\max M}$	$\text{мг/г} \cdot \text{ч}$	192,0
$k_T$	–	0,03
$k_3$	–	1
$k_2$	–	1

### Приклад для розрахунку

Визначити концентрацію метану в газовій суміші з вихідним вмістом метану 15,5 об'ємних відсотків через 1 год біотехнологічної обробки. Розрахувати питому швидкість очищення від метану ( $\text{мг CH}_4/\text{г сухі біомаси}$ ) і припустиму об'ємну швидкість подачі газової суміші в установку обсягом ( $W$ )  $1 \text{ м}^3$  ( $1 \text{ 000 л}$ ). Концентрація біомаси в установці  $0,6 \text{ г/дм}^3$ .

Для розрахунку використовуємо формулу (8.1). Виразимо концентрацію метану в газоповітряному середовищі в  $\text{г/дм}^3$ .

$$S_M = \frac{15,5 \cdot 0,714}{100} = 0,11 \text{ г/дм}^3$$

$S_{y_M}$  розраховуємо (формула 8.2) по вихідній (максимальній) концентрації метану  $S_{0M}$  на початку обробки і по відповідній вихідній концентрації біомаси  $X_0$ :

$$S_{0i} = \frac{S_{0i}}{X_{0i}} = \frac{0,11}{0,6} = 0,183 \text{ (г/г)}.$$

Розраховуємо концентрацію метану в установці після 1 год обробки:

$$S_i(1) = 15,5 \cdot \left[ 0,183 - \frac{1}{0,76} (a^{3,11} - 1) \right] = 0,009 \text{ г/дм}^3.$$

Питома (по біомасі) швидкість окислювання метану (швидкість перетворення субстрату) в установці дорівнює (формула 6.3):

$$\rho = \frac{\Delta S}{\Delta t \cdot X} = \frac{S_i - S_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i) X_i} = \frac{0,11 - 0,009}{0,6} = 0,168 \text{ г СН}_4(\text{г} \cdot \text{год})^{-1}.$$

Питома за об'ємом швидкість очищення газової суміші ( $V_{\text{оч}}$ ) складає  $V_{\text{оч}} = \frac{S_i - S_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)} = 0,101 \text{ г СН}_4 (\text{дм}^3 \cdot \text{год})^{-1}$ . У споруді об'ємом  $1000 \text{ дм}^3$  сумарна швидкість окиснення метану ( $V_{\text{заг}}$ ) дорівнює:

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{оч}} W = 101 \text{ г/год}.$$

Швидкість подачі газової суміші ( $Q_{\text{гс}}$ ) знаходимо з рівняння:

$$Q_{\text{гс}} = \frac{V_{\text{заг}}}{S_{0i}} = \frac{101}{0,11} = 918 \text{ м}^3/\text{год}.$$

### **Завдання для для самостійної роботи**

Розрахувати питому швидкість очищення газоповітряної суміші від метану і корисний об'єм біотехнологічної установки з омиваним шаром метанокисляючих мікроорганізмів. Вихідні дані для розрахунку приведені в таблиці В.1 та В.2 (дод. В).

## **ТЕМИ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ І ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПІДГОТОВКИ**

### **Тема 1 ЕКОЛОГІЧНІ БІОТЕХНОЛОГІЇ: ІСТОРІЯ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ**

1. Історія біотехнології.
2. Нові прикладні напрямки біотехнології.
3. Використання біотехнологічних методів у природоохоронних заходах.
4. Основні напрямки розвитку природозахисних біотехнологій.

### **Тема 2 БІОЛОГІЧНІ АГЕНТИ ЕКОЛОГІЧНИХ БІОТЕХНОЛОГІЙ**

- 1 Біологічні агенти, які використовують у біотехнологіях.
2. Чим зумовлена панівна роль мікроорганізмів як біологічних агентів у біотехнологіях?
3. Прокаріотичні організми.
4. Бактерії. Аеробні та анаеробні організми.
5. Еукаріотичні організми.
6. Найпростіші і їхня роль у біотехнологіях.

### **Тема 3 ОСНОВНІ МЕТАБОЛІЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЕКОБІОТЕХНОЛОГІЯХ**

1. Основні напрямки метаболізму та їхні енергетичні характеристики.
2. Конструктивний метаболізм прокаріотів.
3. Автотрофні і гетеротрофні мікроорганізми.
4. Джерела енергії та донори електронів.

5. Біокаталіз.
6. Катаболізм вуглеводів.
7. Гліколіз, пентозофосфатний шлях та КДФГ шлях.
8. Енергетичний метаболізм прокариотів.

#### **Тема 4 БІОФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОСТУ МІКРОБНОЇ КУЛЬТУРИ**

1. Урожай клітин (X).
2. Метаболічний коефіцієнт.
3. Константа Міхаеліса.
4. Рівняння Моно.
5. Біохімічні та фізіологічні методи досліджень.

#### **Тема 5 СТЕХІОМЕТРИЧНІ, КІНЕТИЧНІ ТА ФІЗІОЛОГІЧНІ КОНСТАНТИ РОЗВИТКУ МІКРОБНИХ ПОПУЛЯЦІЙ**

1. Модель Моно.
2. Хемостат.
3. Стаціонарна питома швидкість росту популяції.
4. Проведення технологічних розрахунків за завданням.

#### **Тема 6 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДОЗАХИСНИХ БІОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

1. Динаміка концентрацій біомаси і субстратів в середовищі.
2. Експериментальне визначення значення економічного коефіцієнта Y.
3. Експериментальне визначення питомої швидкості росту біомаси популяції.
4. Проведення технологічних розрахунків за завданням.

## **Тема 7 КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СКЛАДУ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ НА КІНЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСІВ В ВОДООЧИСНИХ БІОТЕХНОЛОГІЯХ**

1. Найважливіші характеристики біологічних популяцій.
2. Залежність швидкості біохімічних процесів від рН середовища.
3. Оцінка впливу температури на розвиток популяцій.
4. Оцінка впливу «важких» металів на розвиток популяцій. Константа інгібування.
5. Оцінка впливу кисню на розвиток водних мікробних популяцій.
6. Проведення технологічних розрахунків за завданням.

## **Тема 8 РОЗРАХУНКИ БІОТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПОДІБНИХ ВИКИДІВ**

1. Розрахунок концентрації метану в процесі мікробіологічного окиснення.
2. Переведення об'ємних відсотків у  $\text{г/дм}^3$  при розрахунку концентрації газів.
3. Описі питомої швидкості біохімічного окиснення метану.
4. Біокінетичні константи детоксикації метану біотехнологічним методом.
5. Проведення технологічних розрахунків за завданням.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пляцук Л. Д. Екологічна біотехнологія: принципи створення біотехнологічних виробництв : навч. посіб. / Л. Д. Пляцук ; Сумський державний університет. – Суми : СДУ, 2018. – 293 с.
2. Біотехнології в екології : навч. посіб. / А. І. Горова, С. М. Лисицька, А. В. Павличенко, Т. В. Скворцова ; Національний гірничий університет. – Дніпро : НГУ, 2012. – 184 с.
3. Процеси та апарати природоохоронних технологій : підручник : у 2 т. / Л. Д. Пляцук, Р. А. Васькін, В. П. Шапорев та ін. ; Сумський державний університет. – Суми : СДУ, 2017.
4. Природоохоронні технології. Ч. 2. Методи очищення стічних вод : навч. посіб. / В. Г. Петрук, Л. І. Северин, І. В. Васильківський, І. І. Безвозюк. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 258 с.
5. Екологічна біотехнологія / О. В. Швед, О. Б. Миколів, О. З. Комаровська-Порохнявець, В. П. Новіков. – Львів : Львівська політехніка, 2010. – 792 с.
6. Чернякова О. І. Методи захисту атмосфери : конспект лекцій / О. І. Чернякова. – Одеса : ОДЕКУ, 2019. – 89 с.
7. Biological Wastewater Treatment. Principles, Modelling and Design / Guanghao Chen, George A. Ekama, Mark C. M. van Loosdrecht, Damir Brdjanovic. – London : IWA Publishing, 2023. – 89 p.



## ДОДАТОК А

### Вихідні дані для виконання розрахунків заняття 4

Таблиця А.1 – Дані періодичного культивування мікробної популяції на середовищі з хлоридом амонію (варіант 1)

Час (t), год	Концентрація хлориду амонію (S), г/дм <sup>3</sup>	Концентрація біомаси клітин (X), г/дм <sup>3</sup>
0	0,73	0,04
1,0	0,68	0,08
2,0	0,52	0,21
3,0	0,40	0,32
4,0	0,29	0,40
4,5	0,20	0,49
5,5	0,05	0,55
6,5	0	0,64
7,0	0	0,64

Таблиця А.2 – Дані періодичного культивування мікробної популяції на середовищі з сіллю амонію (варіант 2)

Час (t), год	Концентрація N-NH <sub>4</sub> (S), г/дм <sup>3</sup>	Концентрація біомаси клітин (X), г/дм <sup>3</sup>
0	0,10	0,020
1,0	0,097	0,047
2,0	0,090	0,109
3,0	0,074	0,253
3,5	0,059	0,385
4,0	0,037	0,587
4,5	0,004	0,885
4,6	0,0	0,918
4,7	0,0	0,920

Таблиця А.3 – Дані періодичного культивування мікробної популяції (активного мулу) на стічній воді (варіант 3)

Час (t), год	Концентрація органічних речовин, ХСК (S), г/дм <sup>3</sup>	Концентрація біомаси активного мулу (X), г/дм <sup>3</sup>
0	1,40	0,527
1,0	1,358	0,554
2,0	1,262	0,616
3,0	1,038	0,760
3,5	0,832	0,892
4,0	0,518	1,094
4,5	0,054	1,392
4,6	0,003	1,425
4,7	0	1,427

## ДОДАТОК Б

### Вихідні дані для виконання розрахунків заняття 5

Таблиця Б.1 – Стехіометричні, кінетичні, фізіологічні коефіцієнти біотехнологічної детоксикації метану

Показники	Розмірність	Значення
$K_M$ – константа напівнасичення субстратом	мг/дм <sup>3</sup>	12
$\mu_{\max M}$ – максимальна питома швидкість росту популяції	доб <sup>-1</sup>	3,1
$\rho_{\max M}$ – максимальна питома швидкість перетворення субстрату	мг/г · год	192
$M_p$ – масообмін кисню, за якого накопичення біомаси дорівнює $\frac{1}{2}$ оптимальної	мг/м <sup>3</sup>	230

Таблиця Б.2 – Вихідні дані для самостійної роботи

Номер варіанта	Концентрація метанокислючої біомаси в установці ( $X_{0M}$ ), г/дм <sup>3</sup>	Концентрація СН <sub>4</sub> в газоповітр. суміші, що оброблюється ( $S_{0M}$ ), об. %	Швидкість подачі газової суміші ( $Q_{Гс}$ ), м <sup>3</sup> /ч	Масообмін кисню, мг/м <sup>3</sup>
1	0,2	2	0,5	830
2	0,2	4	1,0	600
3	0,2	7	1,5	580
4	0,2	9	2,0	400
5	0,2	15	0,4	730
6	0,2	20	0,2	900
7	0,4	4	0,3	600
8	0,4	9	0,6	830
9	0,4	15	1,2	760
10	0,4	20	2,0	700
11	0,4	25	0,5	830
12	0,4	30	0,5	930
13	0,6	4	2,0	500
14	0,6	8	2,5	600
15	0,6	15	3,0	700
16	0,6	25	0,4	800
17	0,6	30	0,25	900

**ДОДАТОК В**  
**Вихідні дані для виконання розрахунків заняття 7**

Таблиця В.1 – Вихідні дані для самостійної роботи

Номер варіанта	Температура, води, °С	Концентрація розчиненого кисню, мг/ дм <sup>3</sup>	рН водного середовища	Концентрація (ХСК), мг/ дм <sup>3</sup>	Концентрація нітратів, мг/ дм <sup>3</sup>
1	20	0,1	7,2	150	25
2	20	0,1	8,5	15,0	2,5
3	20	0,5	8,0	150	25
4	20	0,5	8,5	15,0	5,0
5	20	1,0	6,4	150	25
6	20	1,0	7,5	50	10
7	20	1,0	8,0	50	25
8	20	2,0	7,0	150	2,5
9	20	2,0	8,0	40	5,0
10	25	0,1	6,2	150	25
11	25	0,1	7,5	15,0	5,0
12	25	0,1	8,5	50	5,5
13	25	0,5	6,2	150	1,0
14	25	0,5	7,4	100	3,0
15	25	0,5	9,0	50	10,0
16	25	1,0	6,4	15,0	1,0
17	25	1,0	7,5	50,0	2,0
18	25	1,0	8,0	150	5,0
19	25	2,0	6,2	150	10,0
20	25	2,0	7,2	45,0	12,0
21	25	2,0	8,5	10,0	15,0
22	25	3,0	7,0	30,0	5,0
23	25	3,0	7,8	50,0	1,0
24	30	0,1	6,2	10,0	10,0
25	30	0,1	7,5	30,0	30,0
26	30	0,1	8,5	150,0	50,0
27	30	0,5	6,0	150	1,0
28	30	0,5	7,0	100	10,0
29	30	0,5	8,0	50	30,0
30	30	1,0	7,0	30,0	2,0
31	30	1,0	8,0	100	5,0
32	30	1,0	9,0	200	10,0
33	30	2,0	6,2	10,0	1,0
34	30	2,0	7,2	30,0	2,0
35	30	2,0	8,5	50,0	5,0

*Електронне навчальне видання*

Методичні рекомендації  
до проведення практичних занять та організації самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

**«БІОТЕХНОЛОГІЇ В ЗАХИСТІ ДОВКІЛЛЯ»**

*(для здобувачів третього (освітньо-наукового)  
рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання  
зі спеціальності 183 – Технології захисту  
навколишнього середовища)*

Укладачі: **ЮРЧЕНКО** Валентина Олександрівна,  
**МЕЛЬНІКОВА** Оксана Григорівна

Відповідальний за випуск *Т. В. Дмитренко*  
Редактор *О. В. Михаленко*  
Комп'ютерне верстання *О. Г. Мельнікова*

План 2024, поз. 88М

---

Підп. до друку 06.09.2024. Формат 60 × 84/16.  
Ум. друк. арк. 2,6.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Черноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: office@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.