

UABIO

Біологічні та технологічні аспекти
культивування мікробіодоростей і
виробництва біометану

Микола Сидоренко та Петро Кучерук
експерти Біоенергетичної асоціації України

ЗНАЙОМСТВО З МІКРОВОДОРОСТЯМИ



Поширення: океани, річки, озера, солоні озера, ґрунти, та інші водні середовища



Розміри: 0,2 – 200 мкм



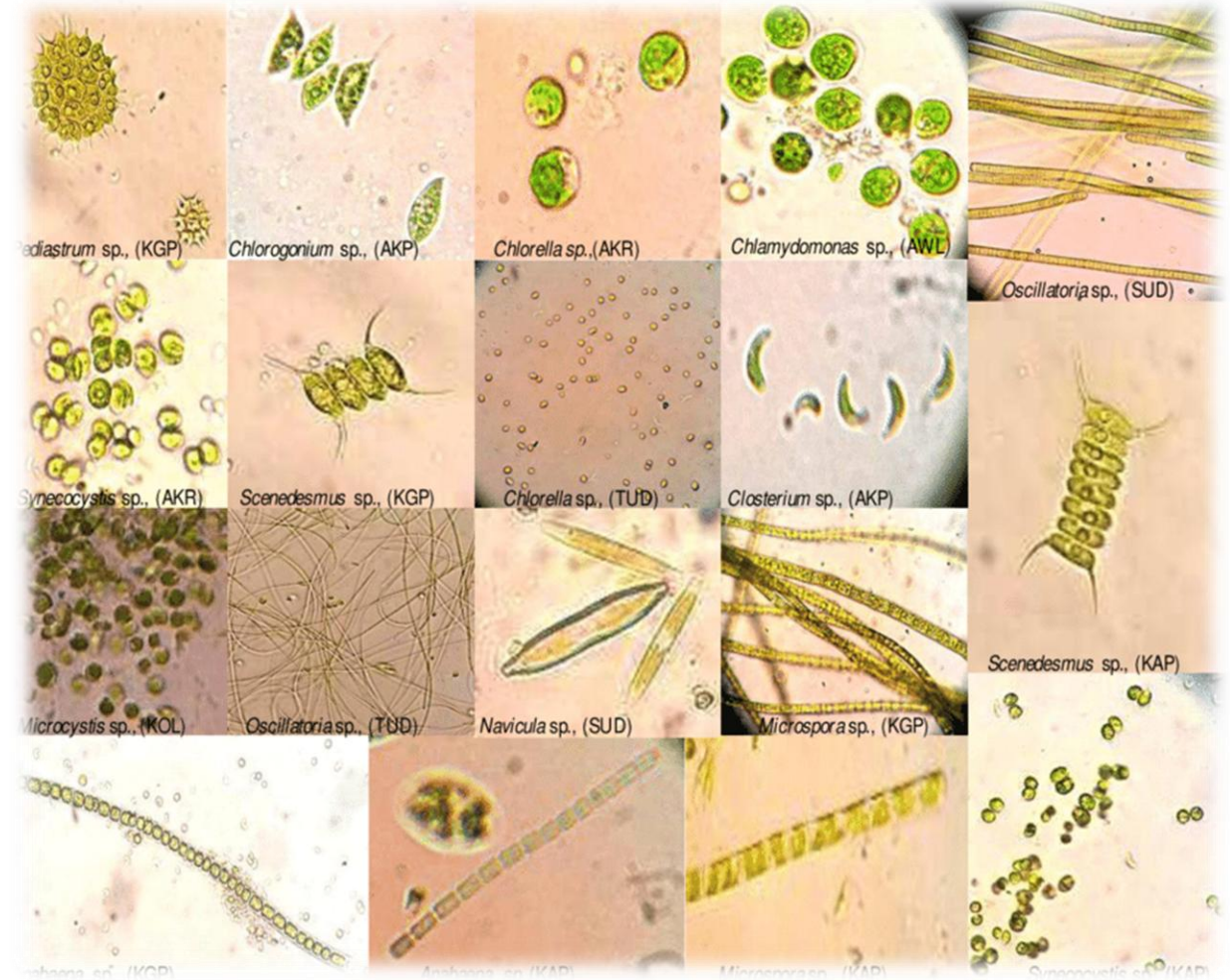
Форма клітин: сферична, овальна, нитчаста, веретеноподібна, зіркоподібна, спіралеподібна, дископодібна та багато інших



Колір клітин: синьо-зелений, зелений, червоний, коричневий, жовтий



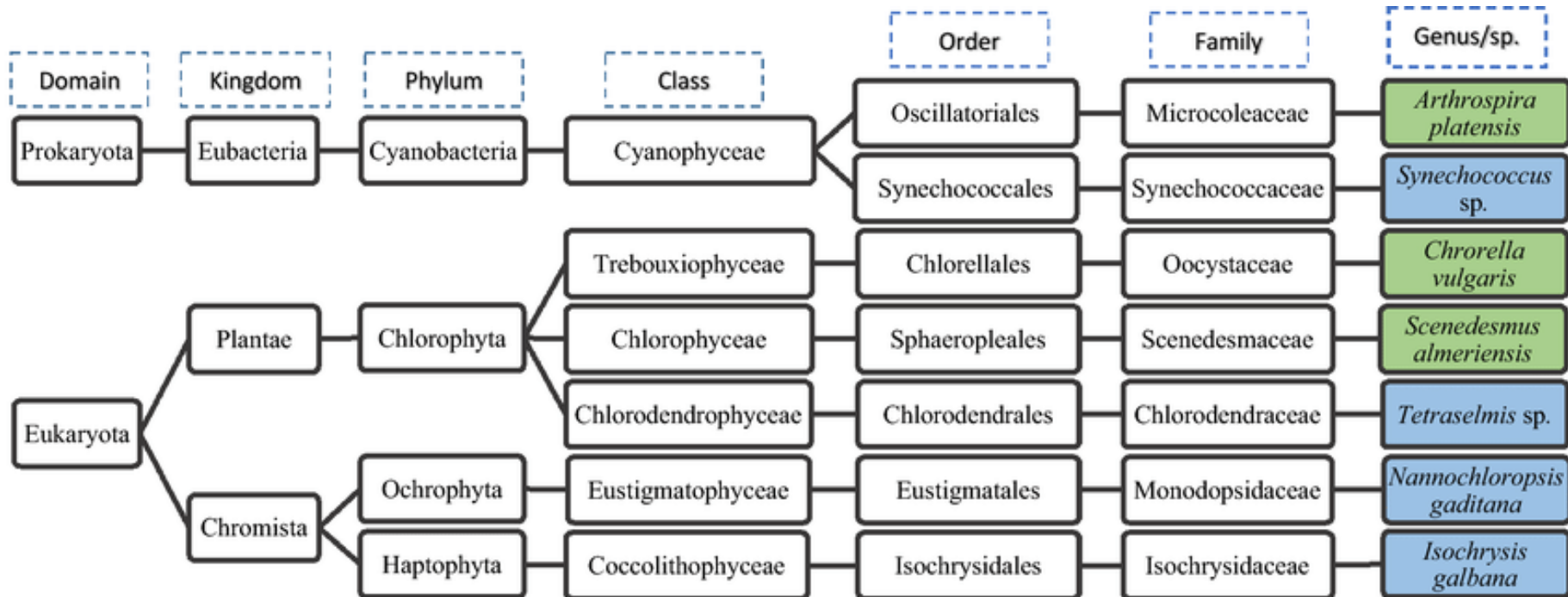
Тип організації: одноклітинні та колоніальні



КЛАСИФІКАЦІЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

Кількість видів у природі
Від 200 000 до 800 000

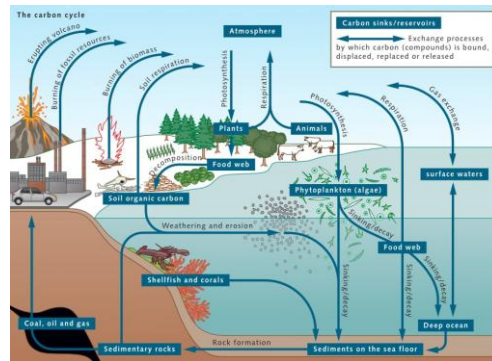
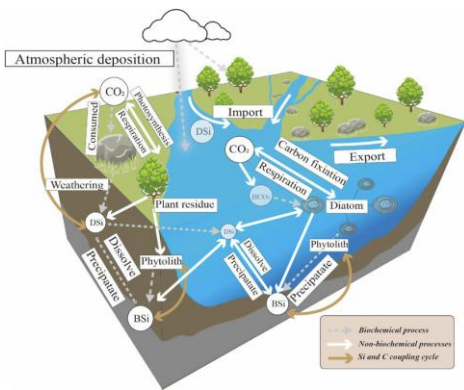
Описано на сьогодні
більше 40 000



РОЛЬ МІКРОВОДОРОСТЕЙ В ПРИРОДІ

✓ Користь

- Асимілюють приблизно 50% CO₂ Землі, при цьому утворюють O₂
- Гетероцистні ціанобактерії відіграють важливу функцію у кругообігу N₂
- Діатомові водорості беруть активну участь в циклі кремнезему
- Є їжею для зоопланктону та риб



× Шкода

- Викликають **цвітіння води** (через евтрофікацію)
- Можуть виділяти **токсини** (забруднення питної води та морських продуктів)

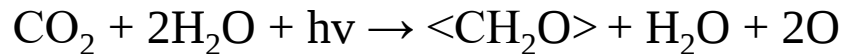


<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1642359322000337?via%3Dihub>

<https://worldoceanreview.com/en/wor-8/the-role-of-the-ocean-in-the-global-carbon-cycle/how-the-ocean-absorbs-carbon-dioxide/>

ПОНЯТТЯ ПРО ФОТОСИНТЕЗ

- **Фотосинтез** — це головний механізм, за допомогою якого мікроводорості здатні перетворювати світлову енергію на енергію хімічних зв'язків, при цьому засвоюючи вуглекислий газ.
- Під час фотосинтезу мікроводорості **можуть фіксувати 1,83 кг CO₂ на 1 кг сухої маси**.
- Мікроводорості мають **високу ефективність фотосинтезу, яка сягає до 6 – 8%** від теоретично можливої, в порівнянні з наземною біомасою 1,8% – 2,2%



Де $h\nu$ — це енергія фотона світла

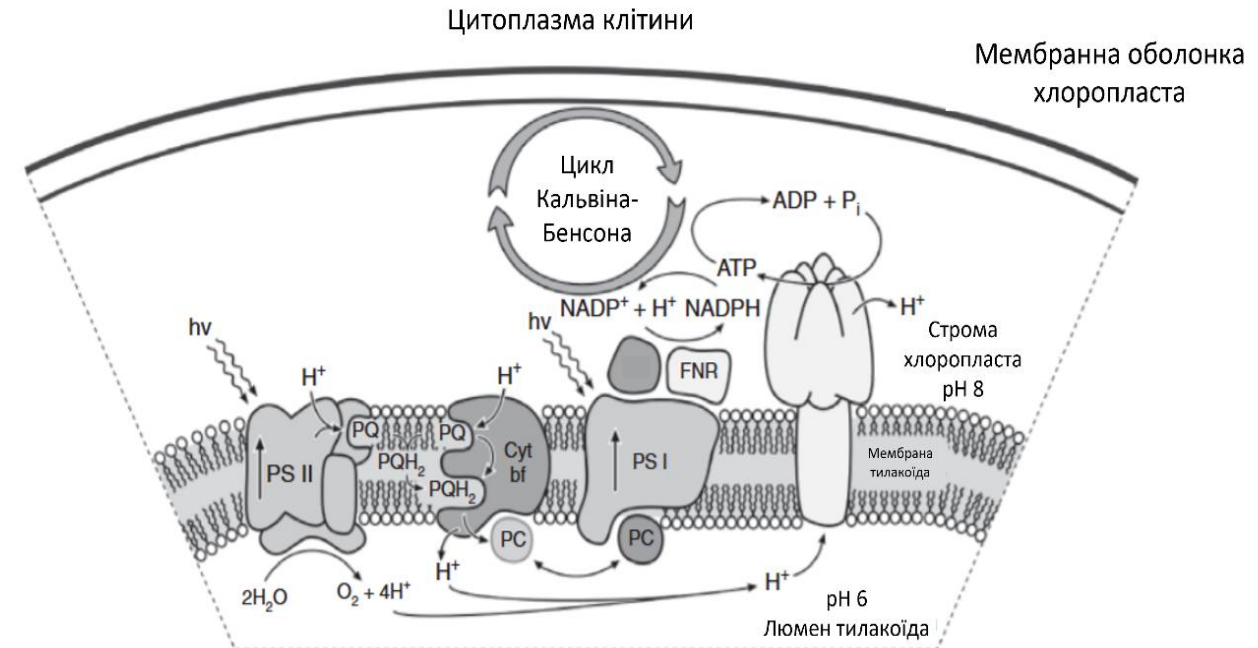


Схема процесу фотосинтезу у мікроводоростей

Позначення: PS II — фотосистема II; PS I — фотосистема I;
PQ — пластохінон; Cyt — цитохром; PC — пластоціанін;
Fd — ферредоксин

ТИПИ ЖИВЛЕННЯ

Тип живлення	Джерело енергії	Джерело вуглецю	Типові субстрати	Переваги	Недоліки
Автотрофія	Світло	CO ₂	CO ₂ , бікарбонати	✓ Утилізація CO₂ ✓ Менший ризик контамінації	✗ Залежність від освітлення ✗ Низька продуктивність ✗ Ефект самозатінення
Гетеротрофія	Органічні сполуки	Органічні сполуки	глюкоза, фруктоза, ацетати, сахароза, стічні води, дигеста, гліцерин, інші	✓ Висока продуктивність ✓ Відсутність потреби в освітленні	✗ Потребує стерилізації ✗ Без утилізації CO₂
Міксотрофія	Органічні сполуки та світло	Органічні сполуки та CO ₂	глюкоза, фруктоза, ацетати, сахароза, стічні води, дигестат, гліцерин CO ₂ , бікарбонати	✓ Менша потреба в освітленні ✓ Найбільша продуктивність ✓ Утилізація CO₂	✗ Залежність від освітлення ✗ Може потребувати стерилізації ✗ Ефект самозатінення ✗ Затінення від субстрату

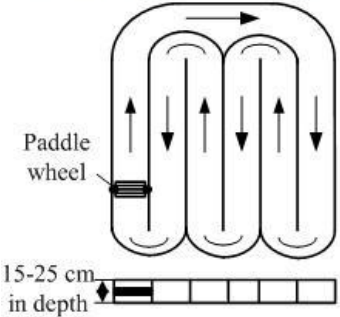
ВІДКРИТІ СИСТЕМИ

Переваги

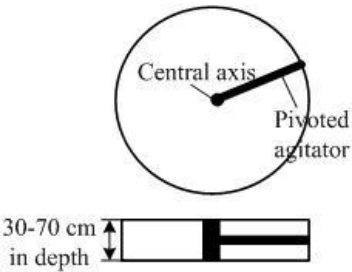
- 10 Низькі капітальні вкладення
- 10 Простота експлуатації
- 10 Потенціал масштабованості

Недоліки

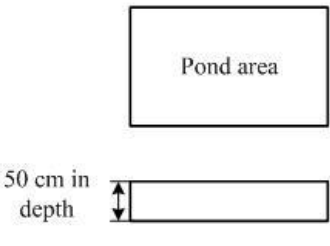
- ❑ Сезонні коливання продуктивності
- ❑ Випаровування води та втрати CO₂
- ❑ Високий ризик контамінації
- ❑ Обмежений контроль над факторами навколишнього середовища
- ❑ Високі витрати на збирання врожаю через низьку концентрацію біомаси



(a) Raceway pond



(b) Circular pond



(c) Unstirred pond

Система культивування	Розмір [м]	Об'єм [л]	Площа [м²]	V/S [л/м²]	Продуктивність біомаси [г/(л·день)]
Відкритий ставок (h = 1 м)	100×100×1	10 млн	10 000	1 000	0,2
Відкритий ставок (h = 0.1 м)	100×100×0,1	1 млн	10 000	100	0,55
Відкритий ставок (h = 0.01 м)	100×100×0,01	100 000	10 000	10	6

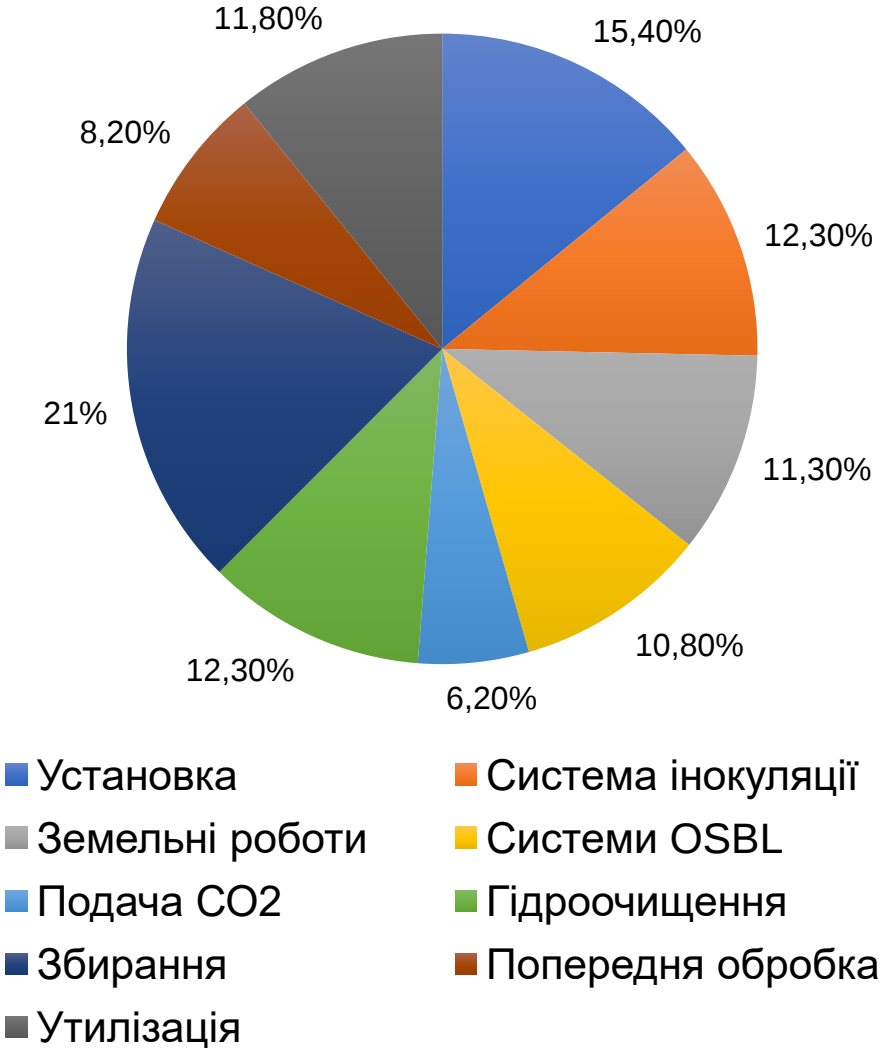
ЗАКРИТІ СИСТЕМИ (ФБР)

Тип ФБР	Переваги	Недоліки	Продуктивність, [г/л/день]
Трубчастий	✓ Менша потреба в освітленні ✓ Найбільша продуктивність ✓ Утилізація CO₂	✗ Залежність від освітлення ✗ Може потребувати стерилізації ✗ Ефект самозатінення ✗ Затінення від субстрату	0,35 - 1,5
Плоскопанельний	✓ Відносно просте обслуговування ✓ Легке масштабування ✓ Короткий світловий шлях ✓ Високе співвідношення поверхні до об'єму	✗ Важко підтримувати рівномірну температуру ✗ Необхідне постійне очищення панелей ✗ Можливість біообростання ✗ Можливість гідродинамічного стресу	0,21 - 1,38
Колонковий	✓ Ефективна аерація та перемішування ✓ Легко масштабується ✓ Низький ризик контамінації ✓ Низькі енергоємності ✓ Відносно невеликий розмір та легкість обслуговування	✗ Може нерівномірно освітлюватись ✗ Потребує обережного контролю подачі газу	0,5 - 1,2

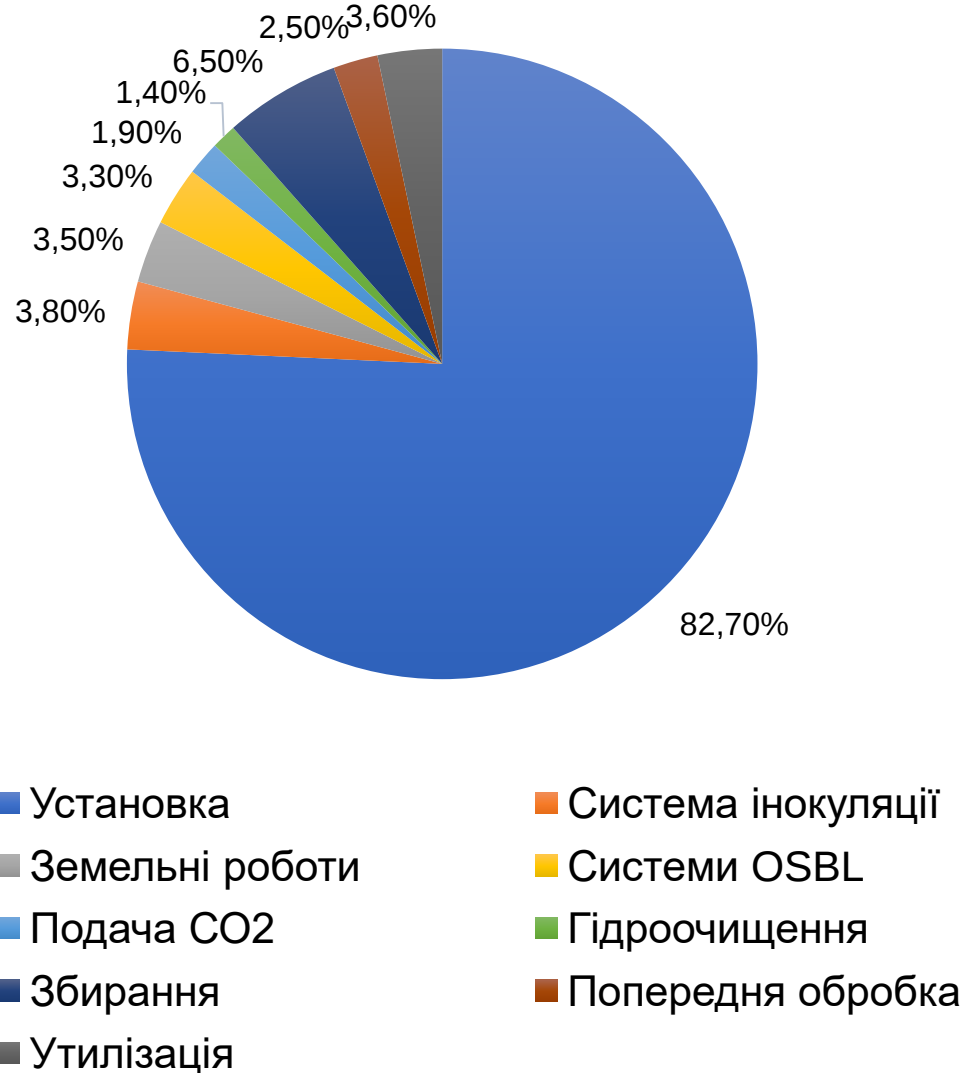


ПОРІВНЯННЯ КАПІТАЛЬНИХ ВИТРАТ СИСТЕМ

Відкриті системи



Закриті системи



ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ КУЛЬТИВУВАННЯ



РЕКОМЕНДОВАНІ ПАРАМЕТРИ

- Температура
- 20 – 30 °C

- Інтенсивність освітлення
- 100 – 500 $\mu\text{моль фотон/м}^2/\text{с}$

- Фотоперіод
- 12:12 або 16:8 год

- pH
- 6,0 – 9,0

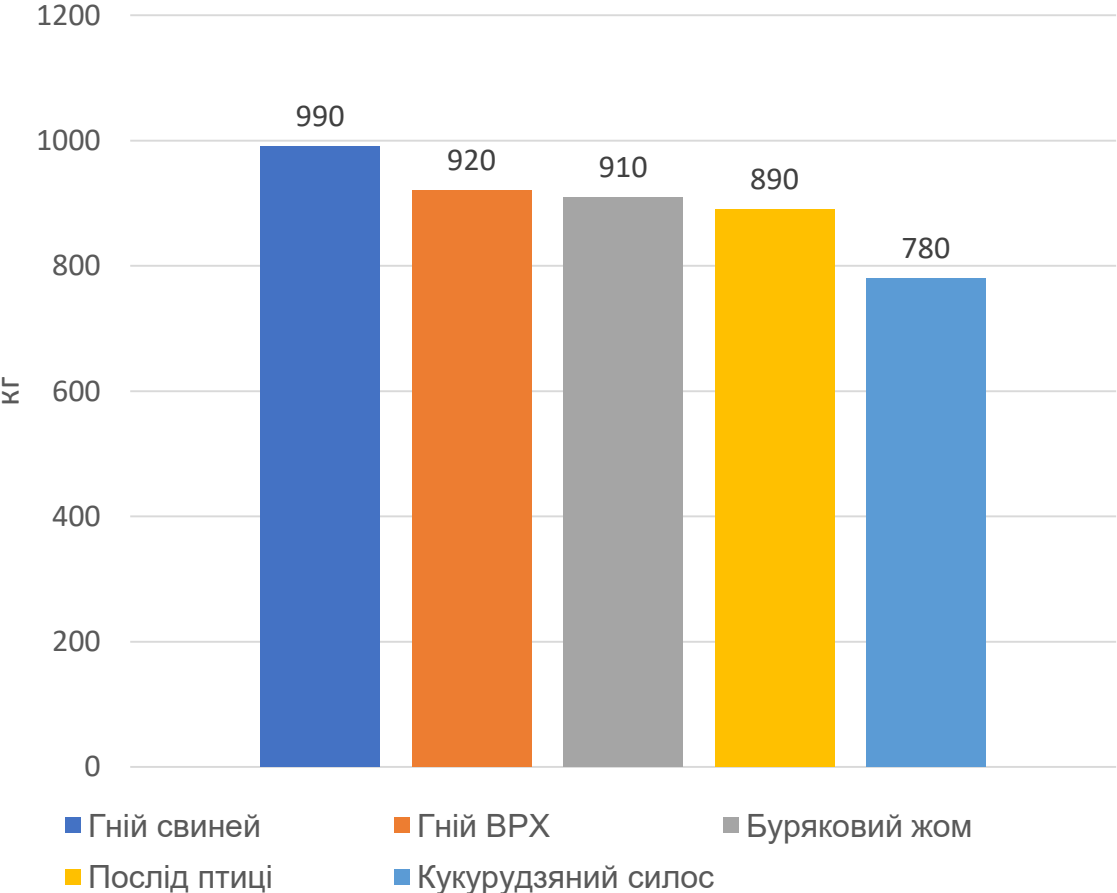
- Солоність
- 0,5 – 18 г/л (залежить від виду)

- Вміст O_2
- 2 – 10 мг/л

Компонент	Джерело (нутриєнт)	Функції	Діапазон необхідних концентрацій
Вуглець	CO_2 , HCO_3^- , CO_3^- та інші	Синтез вуглеводів, білків, ліпідів	1–10 г/л
Нітроген	NO_3^- , сечовина, аміак, N_2 та інші	Синтез амінокислот, нуклеїнових кислот, білків, пігментів, таких як хлорофіл і фікоціанін	10–2000 мг/л
Фосфор	Гідрофосфат, фосфат та інші	Частина кістяка ДНК і РНК, АТФ, фосfolіпідів та нуклеотидів	10–500 мг/л
Сульфур	Сульфати	Синтез амінокислот метіоніну та цистеїну, складова коензимів	1–200 мг/л
K, Ca, Na, Mg та інші	Неорганічні солі	Підтримка структури та життєдіяльності клітин	0,1–100 мг/л
Fe, Zn, Mn, Pb, Cd, та інші	Неорганічні солі	Ко-ферментні фактори	0,01–10 мг/л
Фактори росту	Вітаміни B, C, E, та інші	Входять до складу коферментів	0,01–1000 мкг/л

ХАРАКТЕРИСТИКА ДИГЕСТАТУ

Вихід дигестату на 1 т сировини



- **Біогазова установка** потужністю 1 МВт може виробляти 40–50 тисяч тонн дигестату на рік.
- **Склад дигестату** варіюється залежно від типу сировини, умов ферментації та подальшої обробки
- **Рідка фракція дигестату** містить майжі всі необхідні елементи для вирощування МВ

Показник	Рідка фракція	Тверда фракція
рН	7,7–9,1	7,7–9,3
Загальний азот	6,6 кг/м³	6,8 кг/т
Фосфор	1,9 кг/м³	3,1 кг/т
Калій	6,2 кг/м³	2,7 кг/т
Сульфур	0,27%	1,56%
Марганець (Mn)	21 мг/кг	47,65 мг/кг
Цинк (Zn)	8,2 мг/кг	12,5 мг/кг
Мідь (Cu)	14,1 мг/кг	34,5 мг/кг
Кобальт (Co)	7,2 мг/кг	18,1 мг/кг

ОБМЕЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ДИГЕСТАТУ

Виклики

Причини

Шляхи подолання

Каламутність і високий вміст завислих речовин

Зменшення проникнення світла

- Механічне розділення
- Гравітаційне розділення
- Розбавлення водою
- Фільтрування

Токсичність амонію та вільного аміаку

Вміст амонію досягає до 3000 мг/л, коли MB витримують до ~100 мг/л

- Розбавлення водою

Дефіцит фосфору

Порушений баланс N:P ~7:1

- Довнесення речовин, що містять фосфор
- Розбавлення водою

Наявність важких металів

Гальмує ріст і ферментативну активність

- Розбавлення водою

Патогени та чужорідна мікрофлора

Ризик міжвидової конкуренції

- Термічна обробка
- Фільтрування

Підвищене значення рН

Несприятливі умови для деяких MB

- Розбавлення водою
- Коригування значення рН

ЗБИРАННЯ БІОМАСИ

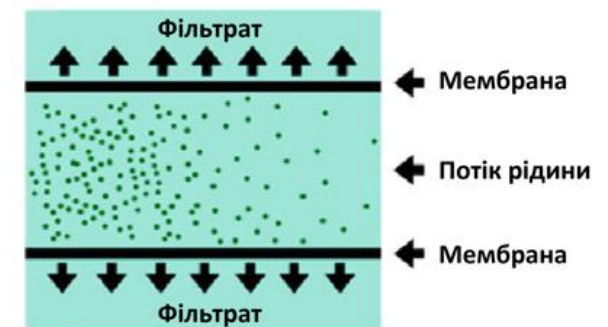
Назва методу	Ефективність збирання біомаси, %	Вміст твердих речовин після збирання, %
Хімічна флокуляція	82 – 99	3 - 8
Фільтрація поперечного потоку	76 - 100	8 -15
Седиментація	66 - 97	2 - 3
Центрифугування	Понад 95	22
Флотація розпиленням повітрям	80 - 90	До 6

Особливості, що заважають збиранню біомаси:

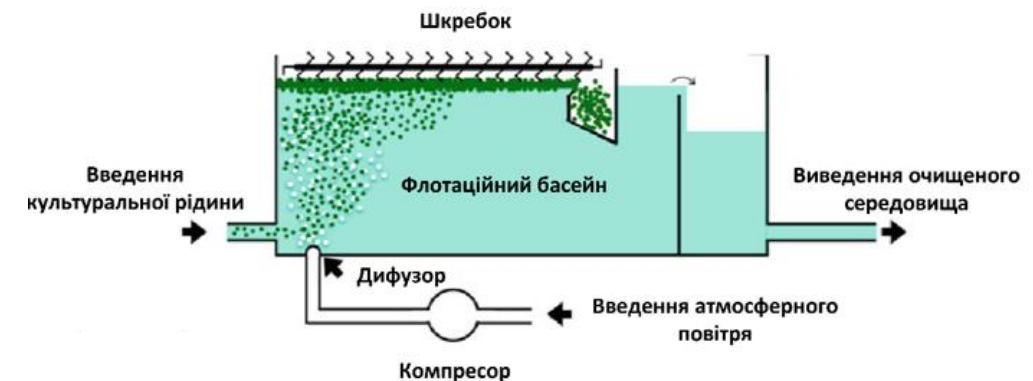
- Розмір клітин
- Форма клітин
- Будова клітинної стінки
- Наявність слизового шару
- Заряд на поверхні клітини



Флокуляція



Фільтрація поперечного потоку



Флотація розпиленням повітрям



Седиментація

МІКРОВОДОРОСТІ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ БІОМЕТАНУ

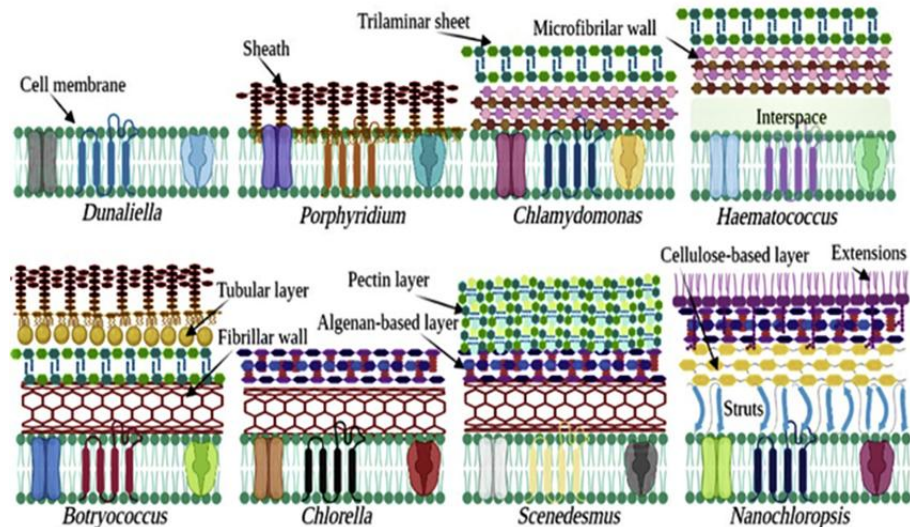
Вид	Білки	Вуглеводи	Ліпіди
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50 – 56	10 – 17	12 – 14
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51 – 58	12 – 17	14 – 22
<i>Spirogyra sp.</i>	6 – 20	33 – 64	11 – 21
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39 – 61	14 – 18	14 – 20
<i>Prymnesium parvum</i>	28 – 45	25 – 33	22 – 38
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3
<i>Spirulina platensis</i>	46 – 63	8 – 14	4 – 9
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11
<i>Anabaena cylindrica</i>	43 – 56	25 – 30	4 – 7

Можуть містити багато білку

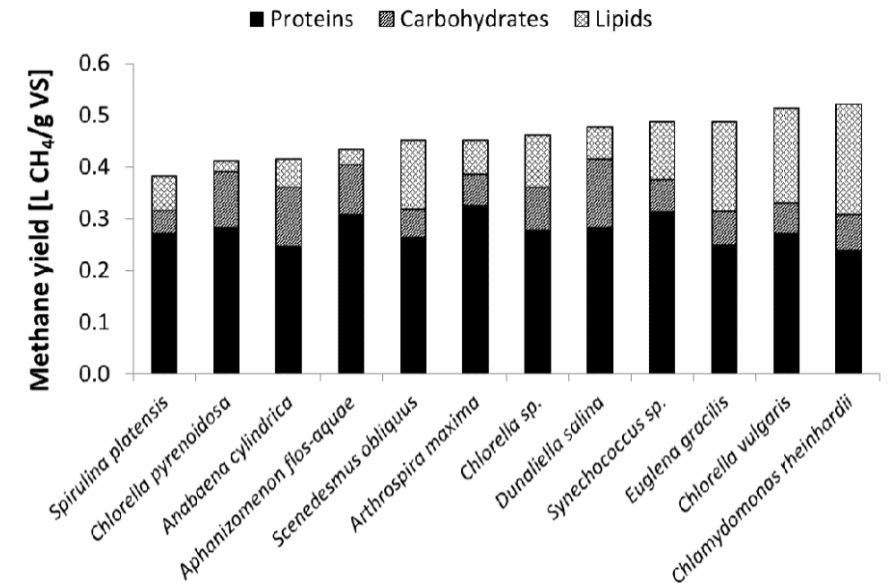
Мають низький C:N

Мають великий потенціал виходу біометану

Можуть мати складну клітинну стінку



Будова клітинних стінок МВ



Теоретичний вихід біометану з різних видів МВ

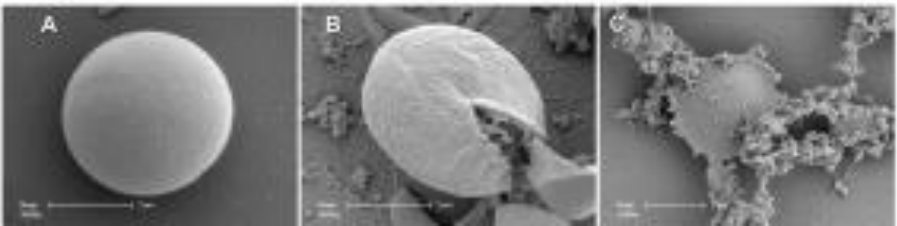
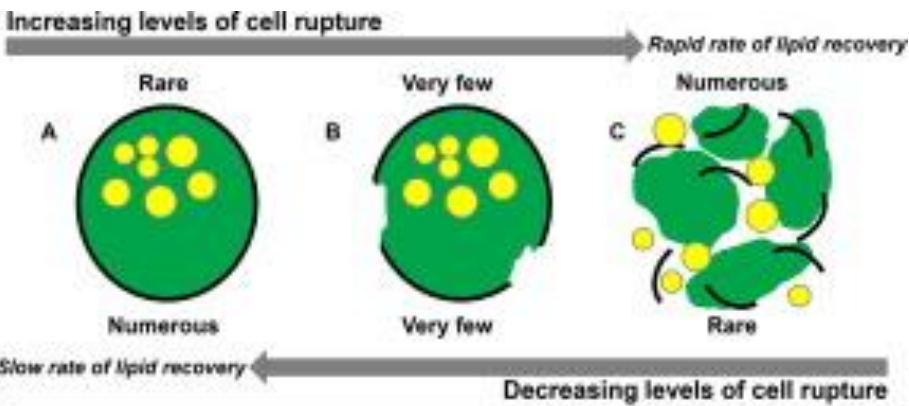
БІОХІМІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ МЕТАНУ 3 МВ

Вид	Температура [°C]	Кумулятивний вихід біогазу [л/кг СОР]	Кумулятивний вихід CH ₄ [л/кг СОР]	Вміст CH ₄ [%]
<i>Arthrospira platensis</i>	-	481 ± 14	293	61
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	-	587 ± 9	387	66
<i>Chlorella kessleri</i>	-	335 ± 8	218	65
<i>Chlorella vulgaris</i>	28 – 31		310 – 350	68 – 75
<i>Dunaliella salina</i>		505 ± 25	323	64
<i>Dunaliella sp.</i>	35	420		
<i>Euglena gracilis</i>		485 ± 3	325	67
<i>Nanochloropsis sp.</i>	38	388	312	80.5
<i>Scenedesmus obliquus</i>		287 ± 10	178	62
<i>Arthrospira sp.</i>	38	556	424	76,3
<i>Arthrospira sp.</i>	35	-	310-320	-
<i>Arthrospira maxima</i>	35	190 – 340		
Суміш (<i>Chlorella ma Scenedesmus</i>)	35 – 50		170 – 320	62 – 64

МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ БІОМАСИ МВ

Основні цілі попередньої обробки:

- Руйнування клітинних стінок
- Зниження в'язкості середовища
- Підвищення біодоступності внутрішньоклітинних сполук
- Оптимізація субстрату для стабільного розщеплення
- Скорочення часу розщеплення



Метод обробки	Опис	Збільшення виходу CH ₄	Примітка
Термічна обробка	Нагрівання до 120 °C протягом 30 хвилин	+41%	Руйнує клітинні стінки; активує ферментативні процеси
Лужний гідроліз	NaOH (1–2%) при кімнатній температурі	+47%	Підвищує доступність білків і полісахаридів; вимагає нейтралізації
Кислотний гідроліз	HCl чи H ₂ SO ₄ (1–2%)	+20–30%	Менш ефективний, ніж лужний; зменшує вміст структурних вуглеводів; вимагає нейтралізації
Механічна дезінтеграція	Подрібнення до стану дрібнодисперсної суспензії	+10–15%	Енергоефективний, простий; може поєднуватися з іншими методами
Комбінована	Нагрівання (100–120 °C) + NaOH	+70%	Найвища ефективність; вимагає великих витрат енергії та хімічних речовин

ПОРІВНЯННЯ СУБСТРАТІВ ДЛЯ КО-ЗБРОДЖУВАННЯ БІОМАСИ МВ

Склад субстрату	C/N	Кумулятивний вихід CH ₄ [л/кг СОР]	Збільшення виходу CH ₄
Біомаса <i>Chlorella</i> sp. та <i>Monoraphidium</i> sp., 20% та Солома пшениці 80%	26,4	289	+12%
Біомаса <i>Spirulina platensis</i> 15% та Гній ВРХ 85%	19	482,54	0%
Біомаса <i>Scenedesmus</i> sp. 15% та Гній свиней 85%	-	298	-1%
Біомаса <i>Nannochloropsis salina</i> 14% та Силос кукурудзи 86%	21,2	264	+15%
Біомаса <i>Chlorella</i> 1067 20% та Курячий послід 80%	8,94	239	+31%
Біомаса <i>Arthrospira platensis</i> 85% та Ячмінна солома 15%	25	347,8	+4,4%
Біомаса <i>Arthrospira platensis</i> 45% та Буряковий жом 55%	25	360,9	-4,3%
Біомаса мікроводоростей 25% та Харчові відходи 75%	18,2	514	+28%
Біомаса <i>Desmodesmus opoliensis</i> 50% та Мелясна барда 50%	10	124,9	+11%

За результатами огляду літератури

ДЯКУЄМО ЗА УВАГУ



Микола Сидоренко

Експерт Біоенергетичної асоціації України

UABIO



PHONE

+38 073 310 8371



EMAIL

sydorenko@secbiomass.com



WEBSITE

<https://uabio.org>



Петро Кучерук

Експерт Біоенергетичної асоціації України, к.т.н

UABIO



PHONE

+380 97 917 7047



EMAIL

kucheruk@secbiomass.com



WEBSITE

<https://uabio.org>