

Виробництво передового біометану

з мікрководоростей
виращених на дигестаті
біогазових станцій в Україні

АНАЛІТИЧНА
ЗАПИСКА № 3

Георгій Гелетуха
Мар'яна Гивель
Микола Сидоренко
Володимир Крамар
Петро Кучерук

Замовник:
The Energy Community

Виконавець:
ГС "БІОЕНЕРГЕТИЧНА
АСОЦІАЦІЯ УКРАЇНИ" (UABIO)

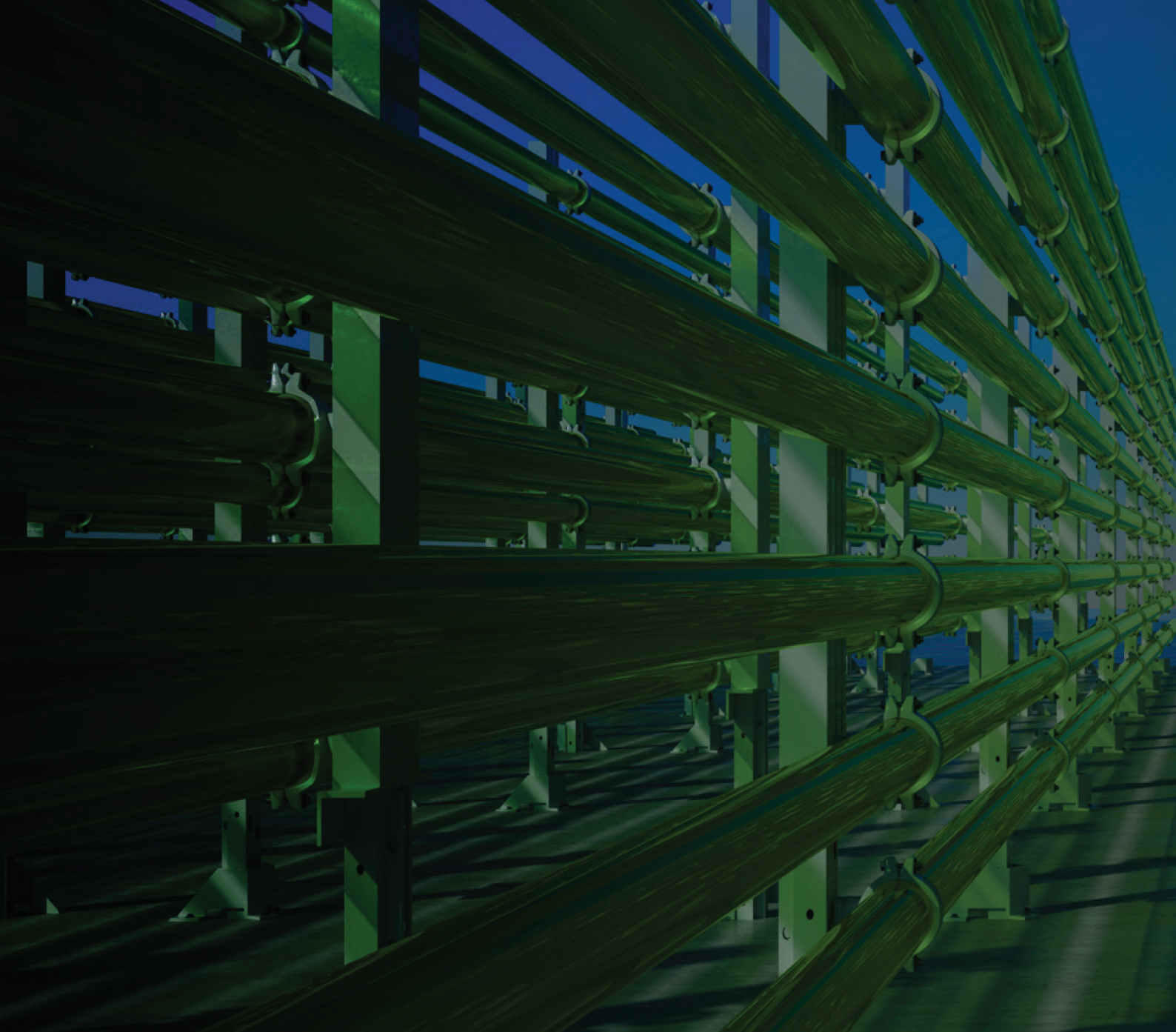
Контракт:
PN01-2025_Ukrainian Biomethane
Sector Development

09/2025

 UK International
Development
Partnership | Progress | Prosperity

UABIO





ОБ'ЄДНУЄМО ЕНЕРГЕТИКУ
ЄВРОПИ СЬОГОДНІ

energy-community.org

ВІДМОВА
ВІД ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ

Цей матеріал було профінансовано завдяки допомозі уряду Сполученого Королівства; проте висловлені думки не обов'язково відображають офіційну позицію уряду Сполученого Королівства.

09/2025

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	4	4. ДИГЕСТАТ ЯК СУБСТРАТ ДЛЯ КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	45
ВСТУП	5	ХАРАКТЕРИСТИКА ДИГЕСТАТУ	45
ВИЗНАЧЕННЯ ТА ТЕРМІНИ	7	ХІМІЧНИЙ СКЛАД ДИГЕСТАТУ	46
1. ОГЛЯД МІКРОВОДОРОСТЕЙ	9	НАЙКРАЩІ ПРАКТИКИ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ДИГЕСТАТУ	47
КЛАСИФІКАЦІЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	9	5. ВИРОБНИЦТВО БІОГАЗУ/БІОМЕТАНУ З МІКРОВОДОРОСТЕЙ	48
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПЕРЕВАГИ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	10	ВИБІР ВИДІВ МІКРОВОДОРОСТЕЙ ТА СИСТЕМИ КУЛЬТИВУВАННЯ	48
ФУНДАМЕНТАЛЬНІ АСПЕКТИ БІОЛОГІЇ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	12	ПАРАМЕТРИ ТА РЕЖИМИ ПРОЦЕСУ	55
2. ВИРОЩУВАННЯ ТА ЗБИРАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	16	МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ БІОМАСИ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	57
ВІДКРИТІ СИСТЕМИ КУЛЬТИВУВАННЯ	18	ІНТЕГРАЦІЯ ВИРОЩУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ У ВИРОБНИЦТВО БІОМЕТАНУ	60
ЗАКРИТІ СИСТЕМИ КУЛЬТИВУВАННЯ (ФОТОБІОРЕАКТОРИ)	19	6. ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ З МІКРОВОДОРОСТЕЙ	63
ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ КУЛЬТИВУВАННЯ	24	ОЦІНКА РИЗИКІВ	66
ЗБИРАННЯ ТА ЗНЕВОДНЕННЯ БІОМАСИ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	28	7. ІНТЕГРОВАНІ ПІЛОТНІ ПРОЕКТИ З УТИЛІЗАЦІЇ CO ₂ , ВИРОЩУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ ТА ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ/БІОГАЗУ	67
3. РИНОК МІКРОВОДОРОСТЕЙ У СВІТІ: ПОТЕНЦІАЛ, ВИРОБНИЦТВО, ТЕХНОЛОГІЇ	33	8. ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ В УКРАЇНІ З УРАХУВАННЯМ МІКРОВОДОРОСТЕЙ, ЩО МОЖУТЬ ВИРОЩУВАТИСЯ НА ДИГЕСТАТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК	75
РИНОК МІКРОВОДОРОСТЕЙ У ЄС, ПІДТРИМКА РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ	33	9. ВИСНОВКИ	78
РИНОК МІКРОВОДОРОСТЕЙ У СВІТІ	36		
ВИХІД БІОМЕТАНУ/БІОГАЗУ З РІЗНИХ ВИДІВ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	39		
ПЕРЕДОВІ БІОПАЛИВА З МІКРОВОДОРОСТЕЙ	42		

Перелік скорочень

AD анаеробне зброджування	НДДКР Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи
бсм мільярдів кубічних метрів	млн га Мільйони гектарів
C:N співвідношення вуглецю до азоту	ФАР Фотосинтетично активна радіація
ТЕЦ Теплоелектроцентрально, когенерація	ФБР Фотобіореактор
ХСК Хімічне споживання кисню	RED Директива з відновлюваної енергетики
СР Суха речовина	SAF Сталий авіаційний паливний продукт
DAF Флотація розчинним повітрям	SOC Органічний вуглець ґрунту
COP Суха органічна речовина	тис. тисяча
EBA Європейська біогазова асоціація	UABIO Біоенергетична асоціація України
ЕС Європейська Комісія	UAH Українська гривня
GHG (ПГ) Парникові гази	ПДВ Податок на додану вартість
IEA Міжнародне енергетичне агентство	
MB Мікроводорості	

Вступ

Метою цієї Аналітичної записки є аналіз перспектив культивування мікроводоростей із використанням побічних продуктів виробництва біометану (CO ₂ , дигестат, тепло) з подальшим отриманням передового біометану та інших цінних продуктів на основі мікроводоростей.	обсягом виробництва близько 1 тонни на місяць. Обидві компанії зосереджуються переважно на випуску харчової спіруліни — одного з найбільш досліджених і комерційно привабливих видів мікроводоростей. Інші компанії, зокрема «Bionet» (торговельна платформа, що працює в Україні), пропонують продукцію на основі спіруліни та хлорели, орієнтуючись на дієтичні добавки та функціональні продукти.
Дослідження охоплює аналіз ринку мікроводоростей, технологічні аспекти їхнього культивування, методи збирання, процеси метанізації та оцінку потенційної економічної ефективності. Здійснено оцінку потенціалу виробництва біометану в Україні з урахуванням мікроводоростей, які можуть бути зібрані на біометанових заводах використовуючи дигестат та CO ₂ , що утворюється в результаті збагачення біогазу.	Промислове виробництво біогазу в Україні фактично розпочалося у 2003 році з першого комерційного біогазового проекту на основі когенерації (CHP) потужністю 160 кВт на свинофермі компанії «Агро-Овен» у селі Оленівка, Дніпропетровська область. Нині в Україні працює 83 біогазові установи, з яких 33 — це комплекси з уловлювання та енергетичної утилізації біогазу з полігонів ТПВ, і ця кількість продовжує зростати ² . У 2024 році в Україні були введені в експлуатацію перші проекти з виробництва біометану, і в найближчій перспективі очікується будівництво десятків нових установок.
Наразі виробництво мікроводоростей в Україні перебуває на ранньому, але перспективному етапі розвитку. Попри відносно невеликі обсяги виробництва у масштабах національної біоекономіки, інтерес до цього сектора швидко зростає, зважаючи на широкий спектр застосувань мікроводоростей — від харчових добавок та фармацевтики до альтернативних джерел енергії та очищення стічних вод.	Потенціал виробництва біометану в Україні, враховуючи її статус країни з найбільшими площами орних земель у Європі, а також значні обсяги сільськогосподарських побічних продуктів та відходів, є одним із найвищих у світі. За оцінками Біоенергетичної асоціації України, цей потенціал становить 21,18 млрд м ³ CH ₄ на рік ³ , (без урахування
Сьогодні в Україні діють щонайменше дві компанії, що займаються промисловим культивуванням мікроводоростей: ТОВ «Food Factory» (бренд <i>Spirulinka</i>) з потужністю близько 12 тонн на місяць ¹ , та ферма <i>Aquatic</i> — локальний виробник у Дніпропетровській області, що застосовує відкриті системи культивування з орієнтовним	

¹ <https://agrotimes.ua/elevator/ukrayinskij-virobnik-spirulini-rozshiryue-potuzhnosti/>

² EBA Statistical Report 2023

³ Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Kucheruk P.P. Perspektivy vyrobnytstva peredovykh biopalyv v Ukraini [Prospects for the production of advanced biofuels in Ukraine]. Energy Technologies and Resource Saving. – V. 76, № 3 (2023), P. 71-82. (Ukr.) <https://www.etas-journal.org/index.php/journal/issue/view/37/40>

потенціалу мікробактерій, викладеного в Аналітичній записці «Виробництво передового біометану з проміжних та покривних культур»), що еквівалентно близько 80% від загального обсягу споживання природного газу в Україні у довоєнному 2021 році.

У результаті процесу анаеробного зброджування утворюється біогаз, який складається переважно з метану, CO₂ та незначних домішок інших газів. Основним напрямом використання біогазу нині є виробництво електроенергії та тепла у когенераційних установках, а останнім часом — виробництво біометану. Під час збагачення біогазу до біометану виділяється значна кількість CO₂ (від 0,5 до 0,9 нм³ CO₂ на 1 нм³ CH₄ у біогазі), який можна ефективно використовувати, знижуючи таким чином викиди парникових газів.

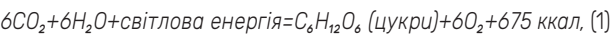
Ще одним продуктом анаеробного зброджування є дигестат — залишкова сировина у вигляді концентрованої мінерально-органічної суспензії з умістом сухої речовини 3–8% та високою концентрацією макро- й мікроелементів, придатних для росту мікробактерій. За поточних видів та обсягів сировини, що використовуються у виробництві біогазу в Україні, середній вихід дигестату становить близько 1,8 тонни сирої маси на кожен МВт•год енергії біогазу або орієнтовно 39,1 тис. тонн на рік на 1 МВт встановленої електричної потужності когенераційної установки. У 2023 році біогазові заводи України згенерували загалом 1,72 млн тонн сирого дигестату². Близько 85–90% цього обсягу становить рідка фракція після відділення за допомогою шнекових сепараторів, з умістом сухої речовини 1–3%. Зазвичай рідка фракція вноситься на поля як добриво, однак економічна доцільність такого застосування обмежується кількома кілометрами навколо біогазової установки. Для довідки: норма внесення рідкого дигестату зазвичай становить близько 20–30 м³ на гектар на рік, що добре ілюструє масштаби невикористаних залишків, які потенційно можуть бути спрямовані на культивування мікробактерій⁴. Підвищення економічної ефективності використання рідкої фракції дигестату залишається актуальним завданням для виробників біогазу. Одним із можливих рішень може стати культивування

мікробактерій на дигестаті з використанням CO₂, що виділяється під час збагачення біогазу, з подальшим поверненням невідокремленої або відстояної суспензії мікробактерій для додаткового виробництва біогазу.

Відповідно до стратегій декарбонізації ЄС, ринкова перевага надається біометану, виробленому з відновлюваної сировини, визначеної в Директиві RED III (Додаток IX), що формує очевидну потребу в інноваційному, економічному та безпечному виробництві біометану на основі альтернативної високопродуктивної біомаси, здатної утилізувати відходи та асимілювати вуглець. Мікробактерії є саме такою перспективною біомасою, коли культивуються у ставках або фотобіореакторах, і включені до переліку Додатку IX Директиви RED III, що надає право на подвійний облік⁵.

Мікробактерії — це фотосинтетичні одноклітинні організми, які використовують CO₂ або комбінацію різних неорганічних та органічних сполук як джерела вуглецю. Вони у 10–50 разів ефективніші за наземні рослини у поглинанні CO₂ та здатні фіксувати 1,83 тонни CO₂ на 1 тону сухої біомаси водоростей. Фотосинтетичне перетворення неорганічного CO₂ в метаболічну енергію, що накопичується у вигляді вуглеводів, білків і ліпідів, є фундаментом продуктивності мікробактерій⁶.

Подібно до наземних рослин, мікробактерії ростуть і розмножуються завдяки фотосинтезу. Фотосинтез — це процес, у ході якого світлова енергія перетворюється на хімічну шляхом поглинання атмосферного CO₂ відповідно до реакції⁽¹⁾:



Цукри, що утворюються в результаті фотосинтезу, перетворюються на інші клітинні компоненти (ліпіди, вуглеводи та білки), які формують біомасу водоростей. Мікробактерії здатні перетворювати сонячне світло на хімічну енергію з високою фотосинтетичною ефективністю (6–8%) порівняно з наземною біомасою (1,8–2,2%)⁷.

5 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02018L2001-20240716>

6 <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00016-1>

7 Studies in Surface Science and Catalysis, 2020. [https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/photosynthetic-efficiency#:~:text=2.1%20Biological%20and%20Biochemical%20Properties,\(1.8%25%E2%80%932.2%25\)](https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/photosynthetic-efficiency#:~:text=2.1%20Biological%20and%20Biochemical%20Properties,(1.8%25%E2%80%932.2%25))

4 Q&A: Tips on using anaerobic digestate as a fertiliser – Farmers Weekly

Концепція технології базується на гіпотезі про можливість ефективного культивування мікробактерій у поживному середовищі на основі дигестату, який містить необхідні макро- та мікроелементи для росту водоростей, із додаванням CO₂, отриманого зі збагачення біогазу до біометану, із подальшою конверсією культивованої біомаси мікробактерій у біогаз та біометан. У результаті фотосинтезу стає можливим більш повне перетворення органічного вуглецю, що міститься у сировині для біогазу, на біометан.

Очікується, що ціна біометану з мікробактерій буде вищою, оскільки такий біометан вважається передовим відповідно до Директиви ЄС RED II (і RED III) та дозволяє досягти значного зниження викидів парникових газів. Водночас використання суспензії мікробактерій для виробництва біогазу не вимагатиме обов’язкового згущення біомаси водоростей (відділення мікробактерій від рідини), оскільки волога, що міститься в суспензії, може слугувати необхідним компонентом у процесі анаеробного зброджування залишків сільськогосподарських культур, потенціал виробництва біогазу яких становить близько 50% від загального потенціалу. Відомо також, що співвідношення C:N в органічній масі мікробактерій нижче 10, що не є

Визначення та терміни

Відновлювана енергія – енергія, що походить із невикопних відновлюваних джерел, включно з вітровою, сонячною, геотермальною, гідроенергією, біомасою, біогазом та біопаливом. Не включає ядерні та викопні джерела.

«Відновлювана енергія» означає енергія з невикопних відновлюваних джерел: вітру, сонця (як сонячне теплове, так і фотогальванічне), аеротермальної, геотермальної, гідротермальної та океанської енергії, гідроенергії, біомаси, газу полігонів, газу очисних споруд і біогазу. – RED II, стаття 2(1).

оптимальним для анаеробного зброджування, але дозволяє збалансувати це співвідношення при комбінуванні з залишками сільгоспкультур із C:N 50–100. Цю проблему можна подолати у рамках циркулярної або інтегрованої установки, поєднуючи мікробактерії із залишками культур, таким чином забезпечуючи баланс загального співвідношення.

Впровадження технології культивування мікробактерій із використанням CO₂ зі збагачення біогазу також вплине на ціну біометану, оскільки уловлювання та використання CO₂ знижує вуглецеву інтенсивність біометанових установок.

Отже, впровадження технології культивування мікробактерій на біометанових установках із рециркуляцією рідкої фракції дигестату, що містить мікробактерії, дозволить зменшити логістичні витрати на обробку дигестату та споживання прісної води, отримати додатковий дохід від передового біометану з мікробактерій, знизити вуглецеву інтенсивність існуючої біометанової установки та водночас створити підхід циркулярної економіки, за якого не утворюється відходів, усі потоки використовуються, а додана вартість генерується ефективно.

Анаеробне зброджування – процес, що включає низку біологічних перетворень, під час яких мікроорганізми розкладають біорозкладний матеріал в умовах відсутності кисню: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез. Біогаз, що утворюється, містить метан (50–70%), вуглекислий газ (30–40%) та інші гази.

Згідно з визначенням українського законодавства⁵, біометан — це біогаз, який за фізико-хімічними характеристиками відповідає вимогам нормативно-правових актів щодо природного газу для постачання в систему транспортування або розподілу газу або для

У межах зелених водоростей (відділ Chlorophyta) виділяють кілька класів, зокрема:

• **Chlorophyceae** – включає одноклітинні, колоніальні та нитчасті форми. Представники: *Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus*, *Volvox*.

• **Trebouxiophyceae** – важлива група симбіонтів лишайників, також включає *Chlorella*.

• **Ulvoiphyceae** – переважно макроводорості, деякі види мають мікроскопічні стадії – група, еволюційно найбільш споріднена з наземними рослинами.

Типові особливості зелених мікроводоростей включають наявність хлорофілів а та b, крохмалю, що зберігається всередині хлоропластів як основний резервний продукт, целюлозних клітинних стінок та (у деяких родів) наявність джгутиків.

Ціанобактерії, такі як *Spirulina*, *Anabaena*, *Oscillatoria* та *Microcystis*, демонструють високу пластичність, здатність до фіксації азоту та адаптацію до екстремальних умов, що робить їх придатними для промислового культивування. Їхня біомаса широко використовується у фармацевтиці, харчовій промисловості, а також як джерело білків, антиоксидантів та пігментів.

Важливо зазначити, що, незважаючи на величезну таксономічну різноманітність, лише невелика частина мікроводоростей наразі культивується для практичних цілей. У біотехнології пріоритет надається видам з високими темпами росту, здатністю накопичувати ліпіди, пігменти або цільові метаболіти. Здатність адаптуватися до масового культивування та оптимізувати продуктивність біомаси також відіграє вирішальну роль. Таким чином, хоча класифікація мікроводоростей є складною, вона залишається критично важливою для наукового та практичного застосування цих організмів у біоекономіці, харчовій промисловості та виробництві біопалива.

Характеристики та переваги мікроводоростей

Мікроводорості – це поліфілетична група фотосинтезуючих організмів, які відіграють ключову роль у глобальних біогеохімічних циклах і становлять значний інтерес у біотехнології завдяки швидкому росту та накопиченню цінних метаболітів. Вивчення морфологічної структури мікроводоростей

є фундаментальним для розуміння їхнього метаболізму, екологічної ролі та потенціалу в різних галузях – від фармацевтики до біоенергетики. Мікроводорості можуть мати різні типи клітинної організації: одноклітинні, колоніальні та ниткоподібні. Більшість одноклітинних ціанобактерій нерухомі, але можуть мати ковзаючу та плавальну рухливість.

Клітинна структура та біохімічний склад

Структура клітинної стінки мікроводоростей відображає значну таксономічну різноманітність. У ціанобактерій вона складається з шести шарів, один з яких – пептидоглікан, що забезпечує механічну жорсткість, тоді як зовнішні шари утворені з мурамової кислоти та полісахаридної слизової оболонки. У еукаріотичних мікроводоростей клітинна стінка складається переважно з целюлозних мікрофібрил, вбудованих в аморфну матрицю полісахаридів, білків та ліпідів. Деякі таксони, такі як *Haematococcus* або *Chlorella*, мають додаткові багатшарові структури, виготовлені з алгенану – високомолекулярного полімеру, стійкого до хімічного розкладу, що ускладнює екстракцію цільових продуктів, але забезпечує екологічну стабільність клітини.

Більшість хлорофітів (зелених мікроводоростей) мають складні та жорсткі клітинні стінки, клітинна стінка яких містить компоненти, вбудовані в матрицю, що містить уронові кислоти разом з іншими нейтральними цукрами. 40% компонентів мікроводоростей легкодоступні для виробництва метану, решта 60% потребують попередньої обробки, щоб зробити внутрішньоклітинний вміст доступним. Склад та архітектура клітинної стінки водоростей та ціанобактерій дуже мінливі, починаючи від крихлих мембран і закінчуючи багатшаровими складними структурами. Залежно від складності поверхневих структур можна виділити чотири типи, як показано на рисунку 1.2.

Фізіологічні та біохімічні властивості

Мікроводорості – це автотрофи, здатні перетворювати сонячну енергію та неорганічні речовини на високоенергетичні біомолекули. У відповідь на стресові фактори, зокрема дефіцит азоту, вони змінюють свою метаболічну стратегію, зміщуючись у бік накопичення ліпідів або вуглеводів. Наприклад, в умовах дефіциту азоту вміст ліпідів у *Chlorella pyrenoidosa* може зрости з 19,7% до понад 50% сухої ваги клітини.

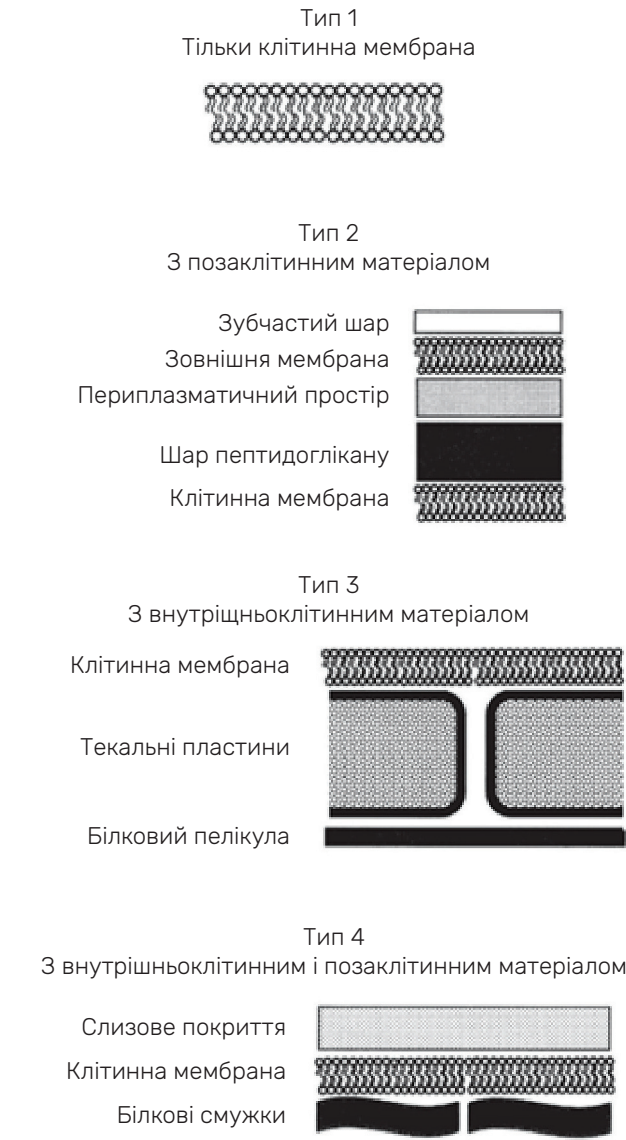


Рис. 1.2 – Схематичне зображення типів клітинних стінок ціанобактерій та водоростей. Адаптовано з Lee, R.E., 2008. Phycology. Cambridge University Press ⁷¹

Мікроводорості можна класифікувати на основі методів їх культивування як гетеротрофні, фотоавтотрофні, фотогетеротрофні або міксотрофні. Як і більшість наземних рослин, мікроводорості є фотосинтезуючими та фотоавтотрофами. Однак деякі види мікроводоростей також є гетеротрофами, використовуючи органічні сполуки в середовищі для росту як джерела вуглецю та енергії, і тому не потребують світла як джерела енергії. Гетеротрофний ріст – це аеробний процес, в якому засвоєння органічних субстратів генерує енергію шляхом окисного фосфорилування, що супроводжується споживанням кисню як кінцевого акцептора електронів. Міксотрофне

культивування – це метод росту, за якого мікроводорості одночасно використовують неорганічні джерела CO₂ та органічного вуглецю за наявності світла; таким чином, фотоавтотрофія та гетеротрофія відбуваються одночасно. CO₂ фіксується шляхом фотосинтезу, на який впливає світло, тоді як органічні сполуки засвоюються шляхом аеробного дихання, на яке впливає наявність органічного вуглецю¹⁰.

Біомаса мікроводоростей багата на білки, вуглеводи, ліпіди, пігменти (такі як хлорофіл, фікобіліни) та вторинні метаболіти, що слугують джерелом цінних біопродуктів. Ця універсальність визначає їхній потенціал для використання в енергетиці, фармацевтиці, сільському господарстві та харчовій промисловості. Серед найбільш вивчених та широко використовуваних видів є:

Ціанобактерії (Arthrospira platensis, Aphanizomenon) – продуценти білка та антиоксидантів (фікоціаніну).

Зелені водорості (Chlorella vulgaris, Haematococcus pluvialis, Scenedesmus obliquus) – відомі високим вмістом білка, антиоксидантів (астаксантину), ліпідів та полісахаридів.

Діатомові водорості (Phaeodactylum tricornutum) – джерело ейкозапентаєнової кислоти (ЕПК).

Гаптофіти та червоні водорості – виробляють сульфатовані полісахариди, цінні для медицини та біоматеріалів.

Органели та внутрішньоклітинні структури

Хлоропласти мікроводоростей містять пігменти, специфічні для кожної групи, включаючи хлорофіли (a, b, c), каротиноїди та фікобіліни (характерні для ціанобактерій та червоних водоростей). Наявність різних пігментів забезпечує ефективне поглинання світла у водному середовищі на різній глибині. Деякі мікроводорості мають спеціальні світлочутливі органели – стигму (або вічко), що дозволяє здійснювати фототаксис. Клітини також можуть містити запасні включення: полісахариди (наприклад, крохмаль, хризоламінарин), ліпіди та поліфосфати.

¹⁰ https://www.researchgate.net/publication/283489490_Microalgal_Heterotrophic_and_Mixotrophic_Culturing_for_Bio-refining_From_Metabolic_Routes_to_Techno-economics

Цитоплазма містить ядро та різні типи органел – компартменти, утворені внаслідок інвагінації плазматичної мембрани та ендоплазматичного ретикулу. Органели включають: хлоропласт, апарат Гольджі, ендоплазматичний ретикулум, рибосоми, мітохондрії, вакуолі, скоротливі вакуолі, пластиди, ліпідні глобули, джгутики та мікротрубочки. Хлоропласт – містить серію сплюснених везикул, або тилакоїдів, що містять хлорофіли, та навколишній матрикс, або строму. Тилакоїди також містять фікобіліпротеїни у фікобілісомах *Rhodophyta*, тоді як у *Cryptophyta* фікобіліпротеїни розподілені всередині тилакоїдів.

Тилакоїди можуть бути вільними або згрупованими в смуги. Піреноїди можуть знаходитися всередині хлоропласту. Багато рухомих форм мають оранжево-червону вічко, або стигму, що складається з ліпідних глобул. Подвійна мембрана оточує хлоропласт; у деяких водоростей, крім цієї подвійної мембрани, присутні одна або дві мембрани ендоплазматичного ретикулу (Рис. 1.3).



Рис.1.3 – Будова клітини еукаріотичних мікроводоростей¹¹

Рухливість та зовнішні структури

Деякі мікроводорості (наприклад, хламідомонади) мають джгутики, що дозволяють їм активно рухатися у товщі води. Інші види, такі як діатомові водорості, рухаються за допомогою слизових виділень через щілину шва. Механізми руху тісно пов'язані з типом клітинної стінки та додатковими зовнішніми структурами.

Таким чином, мікроводорості являють собою універсальний біоресурс, потенціал якого далеко не вичерпаний. Їхня екологічна адаптивність, біохімічна пластичність та інженерний потенціал відкривають широкий спектр застосувань у контексті сталого розвитку.

Морфологічне різноманіття мікроводоростей є результатом складної еволюції та адаптації до різних екологічних ніш. Детальні знання структури клітин дозволяють проводити точнішу таксономічну ідентифікацію, прогнозування фізіологічних властивостей та ефективного використання мікроводоростей у біотехнологічних процесах, включаючи виробництво біопалива, біополімерів, кормів та фармацевтичних препаратів.

Фундаментальні аспекти біології мікроводоростей

Біологічні особливості мікроводоростей демонструють їхню придатність для культивування на дигестаті. Таким чином, важливим кроком до розуміння потенціалу мікроводоростей є ознайомлення з ключовими аспектами їхнього життєвого циклу, які також впливають на майбутні технологічні рішення.

Морфологічні, фізіологічні та структурні характеристики мікроводоростей роблять ці організми високоадаптивними істотами, здатними вижити в різних середовищах¹².

Мікроводорості можна знайти майже в усіх середовищах на Землі, включаючи океани, річки, озера, солоні озера, ґрунт, а також як симбіонти для різних безхребетних.

З точки зору природної мікробіології, ці мікроорганізми відіграють фундаментальну роль у глобальному циклі вуглецю, де шляхом фотосинтезу вони засвоюють приблизно 50% CO₂ Землі, виробляючи при цьому O₂ як побічний продукт, а також органічну речовину¹³. Деякі представники мікроводоростей, зокрема ціанобактерії з гетероцистами, відіграють важливу роль у циклі азоту (N₂) у природному

¹² Jacob-Lopes E, Maroneze MM, Queiroz MI, Zepka LQ. Handbook of Microalgae-Based Processes and Products. Academic Press; 2020. ISBN: 978-0-12-818536-0.

¹³ Prasad R, Gupta S, Nisha S, Oliveira CYB, Nema A, Ansari F. Role of microalgae in global CO₂ sequestration: physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective. Sustainability. 2021;13(23):13061. <https://doi.org/10.3390/su132313061>

середовищі, а діатомові водорості беруть активну участь у циклі кремнію¹⁴.

У водних екосистемах мікроводорості називають фітопланктоном; вони слугують джерелом поживних речовин для зоопланктону та риб, забезпечуючи їх енергією та органічною речовиною. Окрім корисних властивостей, мікроводорості можуть становити й загрозу для інших організмів. Насичення річок, озер і прибережних морських вод біогенними речовинами зі стічних вод промислового чи сільськогосподарського походження часто спричиняє «цвітіння» води (рис. 1.4). Це призводить до зміни кольору води, а також до зменшення концентрації розчиненого кисню, що викликає загибель інших водних організмів. Крім того, деякі мікроводорості здатні виділяти токсини, які можуть забруднювати питну воду та накопичуватися в морепродуктах¹⁵.



Рис. 1.4 – «Цвітіння» води на річці Дніпро¹⁶

Мікроводорості включають як еукаріотів, так і прокаріотів, тому досить складно говорити про їх загальну будову, однак доцільно зупинитися на морфології. Мікроводорості відзначаються значним різноманіттям форм клітин і охоплюють широкий діапазон розмірів – від 0,2 до 200 мікрометрів. Серед найбільш поширених форм клітин: сферична, овальна, ниткоподібна, веретеноподібна, зірчаста, спіралеподібна,

¹⁴ Mishra A, et al. Role of cyanobacteria in rhizospheric nitrogen fixation. In: Cruz C, Vishwakarma K, Choudhary DK, Varma A, eds. Soil Nitrogen Ecology. Vol 62. Soil Biology. Springer; 2021:581–599. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71206-8_25

¹⁵ Thoré ESJ, Muylaert K, Bertram MG, Brodin T. Microalgae. Current Biology. 2023;33(3):R91–R95. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.12.02>

¹⁶ UNIAN <https://www.unian.ua/ecology/naturalresources/10216565-zeleniy-kisil-ekologi-b-yut-na-spoloh-cherez-cvitinnya-vodi-v-dnipro-yaka-nas-vbivaye-foto.html>

дископодібна та багато інших. Особливістю є те, що така різноманітність спостерігається не лише між родами й видами, а й на різних фазах росту клітин (рис. 1.5).

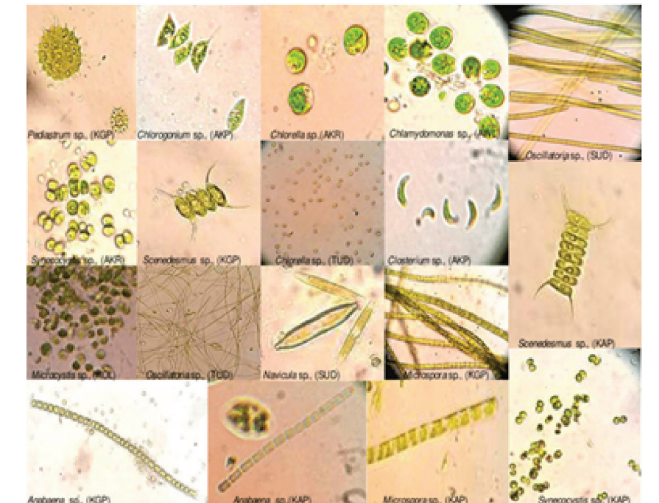


Рис. 1.5 – Мікроскопія деяких видів мікроводоростей¹⁷

Мікроводорості є дуже адаптивними щодо способів живлення. Залежно від виду та умов середовища їхнього існування, вони можуть реалізовувати автотрофний, гетеротрофний та міксотрофний типи живлення.

Автотрофія є найпоширенішим типом живлення мікроводоростей у природі. Представники, які реалізують виключно цей тип, – *Porphyridium cruentum*, *Chaetoceros muelleri*, *Tetraselmis suecica*, *Skeletonema costatum* та інші. Під час такого живлення вони використовують сонячне або штучне освітлення як джерело енергії, а джерелом вуглецю виступає газоподібний чи розчинений CO₂ та бікарбонати. Цей тип живлення є особливо цікавим з точки зору утилізації CO₂, що утворюється внаслідок діяльності людини. Основні обмеження виникають через освітлення: штучне освітлення потребує значних енерговитрат, а зі зростанням концентрації біомаси виникає ефект самозатінення, що суттєво знижує ефективність фотосинтезу та продуктивність культури¹⁸.

¹⁷ Suresh A, Ayele A, Benor S. Isolation and morphological identification of some indigenous microalgae from Ethiopia for phycoprospecting. Ethiopian Journal of Science and Sustainable Development. 2019;6(2):56–60. <https://doi.org/10.20372/ejssdastu.v6.i2.2019.102>

¹⁸ Dhanasekaran D, Thajuddin N, Panneerselvam A, Rajendran R. Microalgae: A promising biological system for biofuel production and other applications. Nigerian Journal of Pharmaceutical and Pharmacological Research. 2018;8(1):1–10. <https://doi.org/10.5455/njppp.2018.8.0935625122017>

¹¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975019301193?via%3Dihub>

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики типів живлення мікродоростей^{18,19,20}

Тип живлення	Джерело енергії	Джерело вуглецю	Типові субстрати	Переваги	Недоліки
Автотрофія	Світло	CO ₂	CO ₂ , бікарбонати	• Утилізація CO₂ • Нижчий ризик контамінації	• Залежність від світла • Низька продуктивність • Ефект самозатінення
Гетеротрофія	Органічні сполуки	Органічні сполуки	Глюкоза, фруктоза, ацетати, сахароза, стічні води, дигестат, гліцерин, інші	• Висока продуктивність • Відсутня потреба в освітленні	• Необхідність стерилізації
Міксотрофія	Органічні сполуки + світло	Органічні сполуки + CO ₂	Глюкоза, фруктоза, ацетати, сахароза, стічні води, дигестат, гліцерин; CO ₂ , бікарбонати	• Знижена потреба в освітленні • Найвища продуктивність • Утилізація CO₂	• Залежність від світла • Необхідність стерилізації • Ефект самозатінення

Гетеротрофний тип живлення не потребує наявності світла, а джерелом вуглецю та енергії виступають органічні сполуки. У порівнянні з автотрофним, гетеротрофний забезпечує суттєво вищу продуктивність культур: якщо для автотрофного вона становить 0,35–0,4 г/л/добу, то для гетеротрофного – 1,7–4 г/л/добу¹⁹. Типовими представниками, що реалізують цей тип живлення, є *Cryptocodinium cohnii*, *Galdieria sulphuraria*, *Auxenochlorella protothecoides*. Біохімічний склад мікродоростей з гетеротрофним типом живлення переважно представлений вуглеводами та ліпідами, тобто така біомаса краще підходить для виробництва біометану. Основним недоліком гетеротрофії є необхідність стерилізації поживного середовища через ризик контамінації сторонніми мікроорганізмами, що можуть пригнічувати або повністю зупиняти ріст мікродоростей.

Міксотрофія поєднує обидва попередні типи живлення, дозволяючи мікродоростям одночасно здійснювати фотосинтез і засвоювати органічні сполуки. Найбільш відомими представниками міксотрофів є *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, *Euglena gracilis*. Крім того, у разі нестачі необхідних

речовин вони можуть бути як автотрофами, так і гетеротрофами, що надає їм значні переваги. Цей тип живлення забезпечує найбільший приріст біомаси з утилізацією CO₂ і кращу адаптацію до стресових умов. Однак для використання всіх переваг цього типу необхідна попередня обробка субстратів задля зменшення їхньої мутності та підвищення світлопроникності до клітин. Цей метод також характеризується високими ризиками контамінації та ефектом самозатінення. Попри недоліки, міксотрофія дозволяє отримувати 3–5,18 г/л/добу¹⁹.

Одним із ключових аспектів біології мікродоростей, який варто розглянути, є **фотосинтез**. Це основний механізм, завдяки якому мікродорості здатні перетворювати світлову енергію на хімічну з одночасним поглинанням вуглекислого газу. Даний процес забезпечує клітину будівельним матеріалом для росту та енергією. Головна відмінність мікродоростей від тварин полягає в тому, що мікродорості синтезують органічні сполуки з неорганічних, тоді як тварини споживають лише готові речовини.

У еукаріотичних мікродоростей фотосинтез відбувається в **хлоропластах**, тоді як у прокаріотичних мікродоростей хлоропласти відсутні, і процес фотосинтезу здійснюється в **тилакоїдах**, розташованих безпосередньо у цитоплазмі.

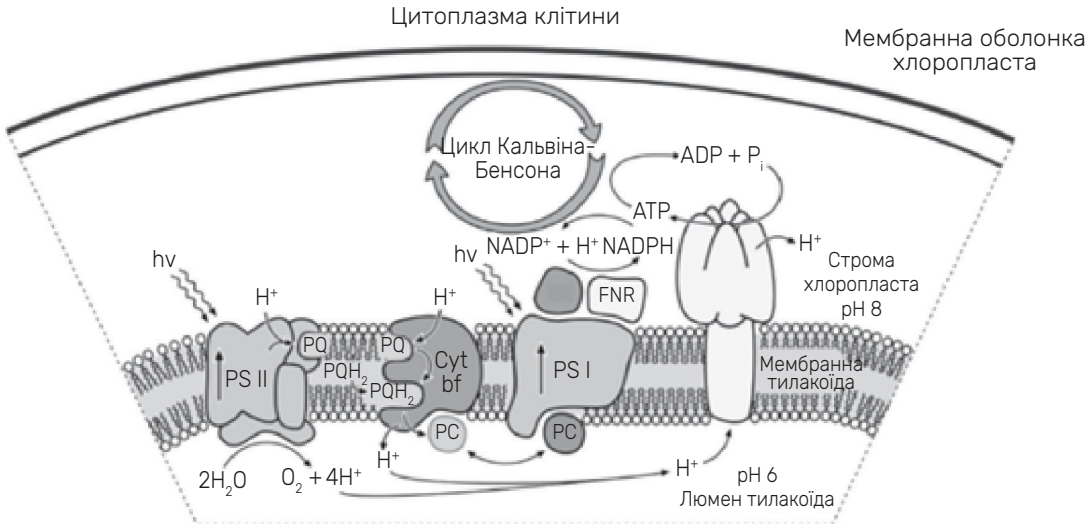
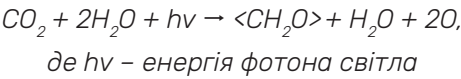


Рис. 1.6 – Схема процесу фотосинтезу в мікродоростях
Позначення: PS II – фотосистема II; PS I – фотосистема I; PQ – пластохінон; Cyt – цитохром; PC – пластоціанін; Fd – ферредоксин

Фотосинтез поділяється на світлову та темнову фази. Під час **світлової фази** фотони світла активують фотосистему II (PS II), що призводить до вивільнення електрона. Для компенсації втрати електронів відбувається **фотоліз води**, внаслідок чого утворюється молекулярний кисень, а також протони H⁺, які використовуються АТФ-синтазою для утворення АТФ. Електрон із фотосистеми II послідовно переноситься через пластохінон (PQ), цитохромний комплекс (Cyt), пластоціанін (PC) до фотосистеми I (PS I), де знову під дією світла фотосистема збуджується й далі передає електрон на ферредоксин, а з нього – на НАДФ із утворенням НАДФН. Накопичена енергія у формі НАДФН та АТФ використовується у **темновій фазі** в циклі Кальвіна–Бенсона, де відбувається фіксація CO₂ та утворення вуглеводів і проміжних метаболітів, що надалі застосовуються для біосинтезу жирних кислот, амінокислот і органічних кислот²⁰.

Загальне рівняння фотосинтезу можна подати таким чином:



Мікродорості характеризуються високою ефективністю фотосинтезу, яка сягає 6–10%

від теоретично можливої, тоді як для наземної біомаси цей показник становить лише 1,8–2,2%. Це пояснюється їхньою адаптацією до умов існування у водному середовищі. Зокрема, вони мають короткий шлях перенесення електронів, високу щільність фотосистем, а їхній фотосинтетичний апарат пристосований до дифузного світла та короточасних змін освітленості. Фотосистеми мікродоростей можуть перемикатися між лінійним і циклічним транспортом електронів, що дозволяє регулювати співвідношення НАДФН та АТФ відповідно до потреб клітини²¹.

Ще однією адаптацією є наявність механізмів концентрування вуглецю. Це забезпечується наявністю у деяких мікродоростей піраноїдів, а також розвиненими системами транспорту HCO₃⁻ і CO₂, які гарантують концентрацію CO₂ безпосередньо поблизу ферменту RuBisCO. Вони здатні ефективно фіксувати неорганічний вуглець навіть за умов низької концентрації CO₂ у середовищі, а також знижувати негативний ефект фотодихання за високих концентрацій O₂²².

Мікродорості також мають широкий спектр фотозахисних реакцій проти надлишкового світла. Вони здатні перетворювати надлишкову енергію хлорофілу на тепло, запобігаючи пошкодженню фотосистеми. Крім того, вони можуть швидко перебудовувати антенні комплекси фотосистем, зменшуючи площу світлопоглинання. Багато видів

¹⁹ Yun HS, Kim YS, Yoon HS. Effect of different cultivation modes (photoautotrophic, mixotrophic, and heterotrophic) on the growth of *Chlorella* spp. and biocompositions. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021;9:774143. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.774143>

²⁰ Pirog, T. P. General Microbiology: Textbook, 2nd ed., revised and expanded; Kyiv: National University of Food Technologies, 2010; 632 pp.

мікроводоростей здатні посилювати біосинтез каротиноїдів, які захищають клітини від окисного стресу.

Мікроводорості мають побічний процес – фотодихання. Воно безпосередньо конкурує з фотосинтезом і призводить до перетворення органічних речовин у клітині на CO₂, серин та аміак без отримання метаболічної користі. Це відбувається внаслідок дії ферменту

RuBisCO, який за відсутності CO₂ або за значного надлишку O₂ каталізує реакцію окиснення рибулозобіфосфату. Для отримання максимальної кількості біомаси необхідно мінімізувати фотодихання. Це можна досягти шляхом підтримання вищого співвідношення CO₂/O₂, ніж у повітрі, а також оптимального освітлення культури, щоб уникнути створення стресових умов ²².

Вирощування та збирання мікроводоростей

Системи масштабного виробництва мікроводоростей і ціанобактерій зазвичай поділяються на три основні типи: відкриті ставки, фотобіореактори (ФБР), системи на основі біоплівки, або їх комбінації. Відкриті ставки відносно прості та недорогі порівняно з фотобіореакторами; проте вони потребують великої площі, є неефективними для уловлювання викидів CO₂, вразливими до несприятливих погодних умов (дощ, випаровування) і схильні до контамінації. Це робить їх менш придатними для певних застосувань, таких як вирощування біомаси харчового та кормового класу.

Фотобіореактори, навпаки, більш надійні, але значно дорожчі як за капітальними витратами (CAPEX), так і за експлуатаційними витратами (OPEX). Ці системи є складними інженерними структурами, призначеними для підтримки оптимальних умов росту мікроводоростей. Вони потребують безперервного моніторингу та контролю численних параметрів, включно з асептичними умовами, температурою, рН, редокс-потенціалом, рівнем розчиненого кисню, доступністю CO₂, ключовими поживними речовинами, швидкістю потоку рідини та інтенсивністю змішування.

ФБР проектується з високим співвідношенням площі поверхні до об'єму, щоб максимально ефективно використовувати світло. Однак

РОЗДІЛ 2

такий принцип конструкції може призводити до теплових втрат у відсутності освітлення. Тому важливим є розуміння теплового балансу в ФБР для точного прогнозування продуктивності біомаси ²¹.

Фотобіореактори можна класифікувати за різними конструктивними ознаками, включно з орієнтацією, механізмом циркуляції культури, методом освітлення, конфігурацією, режимом роботи (пакетний або безперервний) та режимом культивування ²².

На промисловому рівні найпоширенішими є **трубчасті системи**; проте кожен тип має власні переваги та недоліки. Вибір ФБР має відповідати цілям проекту, географічному розташуванню та вимогам масштабування. У випадку вирощування мікроводоростей на дигестаті основною метою є максимізація продуктивності біомаси. Для цього найбільш придатними вважаються **плоскі фотобіореактори**, оскільки вони дозволяють досягати найвищої продуктивності біомаси (1,5–28 г/(л ×добу)).

21 Giovanna Salbitani, Simona Carfagna. Ammonium Utilization in Microalgae: A Sustainable Method for Wastewater Treatment. Sustainability 2021, Vol. 13(2), P.956; <https://doi.org/10.3390/su13020956>

22 Anas Al-Dailami, Iwamoto Koji, Imran Ahmad1, Masafumi Goto. Potential of Photobioreactors (ФБР) in Cultivation of Microalgae. Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology. 2022.Vol.27. No.1. P.32–44 <https://doi.org/10.37934/araset.271.3244>

Таблиця 2.1 – Порівняння найпоширеніших систем для вирощування мікроводоростей ^{72 71 70}

ФБР	Переваги	Недоліки	Продуктивність біомаси, г/(л·добу)
Відкриті ставки	- Економічність - Легке очищення - Низьке енергоспоживання - Легко масштабуються - Низькі витрати на обслуговування	- Складно контролювати параметри - Низька продуктивність біомаси - Можливість контамінації - Потребує великої площі - Неефективне змішування	0,03-0,2
Вертикальні ФБР (аерліфтні та колонні)	- Висока продуктивність біомаси - Висока ефективність фотосинтезу - Обмеження фотоінгібіції та фотоокислення - Невелика площа для будівництва - Підходять для вирощування на відкритому повітрі - Низький ризик контамінації - Низьке енергоспоживання - Невисока вартість, компактні та легкі в обслуговуванні	- Можливий механічний стрес клітин - Низьке освітлення та мала площа освітлення - Схильність до обростання стінок реактора	0,5-10
Горизонтальні трубчасті ФБР	- Велика освітлювана площа - Підходять для розміщення на відкритому повітрі - Хороша продуктивність - Відносно недорогі - Масштабовані - Легкий контроль - Однорідне змішування - Добрий контроль температури	- рН-градієнт - Втрати - Обростання стінок - Потребує значної площі - Гідродинамічний стрес - Можливий низький газообмін	0,35-1,5
Плоскі ФБР	- Максимальне сонячне освітлення - Високе співвідношення площі до об'єму - Підходять для відкритого культивування - Висока продуктивність біомаси - Добре розподілене освітлення - Відносно низька вартість - Легко будувати, очищати та обслуговувати - Висока ефективність фотосинтезу - Низька концентрація розчиненого кисню	- Складність масштабування - Складність культивування - Регулювання температури - Можливе обростання - Можливий гідродинамічний стрес клітин	1,5 -28

Відкриті системи культивування

Відкриті системи культивування мікроводоростей є найпоширенішим типом установок, що використовуються для масштабного виробництва біомаси на комерційному рівні. Незважаючи на наявність альтернативних технологій, відкриті системи (особливо відкриті ставки) залишаються актуальними завдяки простій конструкції, економічності, легкості експлуатації та довговічності порівняно із закритими фотобіореакторами (Richmond, 1999).

Класифікація та типи відкритих систем

Існує кілька основних типів відкритих ставків, які відрізняються формою, способом змішування культури, матеріалами конструкції та рівнем автоматизації:

а. **Нахилені системи:** Культура стікає по нахиленій поверхні під дією гравітації. Висока турбулентність забезпечує ефективний газообмін і концентрацію клітин до 10 г/л. Проте такі системи схильні до втрат CO₂, випаровування і потребують значної енергії для перекачування (Doucha & Livansky, 1999). На сьогодні їхнє комерційне використання обмежене.

б. **Круглі (радіальні) ставки:** Здебільшого застосовуються в Азії (Японія, Тайвань, Індонезія) для вирощування *Chlorella*, але потребують великих інвестицій у бетонні конструкції та енергію для обертання мішалок.

с. **Raceway-ставки:** Це найпоширеніші системи у комерційному виробництві, особливо для *Arthrospira platensis* (Спіруліна) та *Dunaliella salina*. Вони виконані у вигляді замкнених овальних каналів з пластиковою підкладкою, де культура циркулює завдяки гребному колесу. Схема реактора raceway ставки наведена на рисунку 2.1. Він складається з двох каналів, з'єднаних вигинами, через які циркулює вода під дією гребного колеса. Зазвичай використовується седиментаційна камера для газового спарингу, а вигини мають бути правильно спроектовані, щоб мінімізувати втрати тиску у системі. Можливі різні конфігурації седиментаційних камер — з перегородками або без них, з одно- або протитечею газо-рідинного контакту. Прості raceway-системи зазвичай забезпечують середню продуктивність **12–13 г/м²/добу**, хоча за оптимальних умов можна досягти **20–25 г/м²/добу** (Borowitzka, 1999; Lee, 2001).

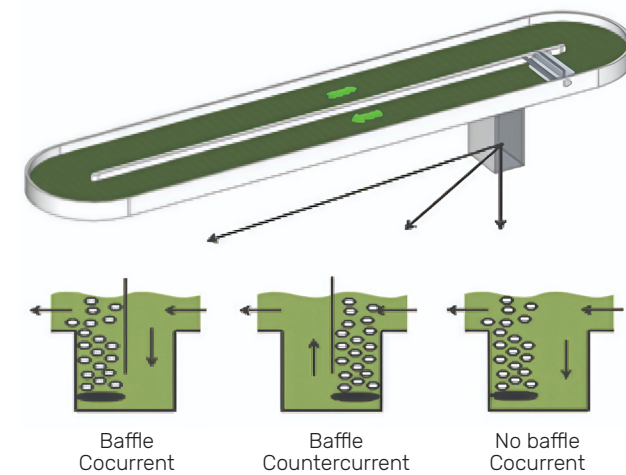


Рис. 2.1 – Схема та фотографія реактора raceway-ставки^{71, 23}

Природні та напівприродні водні ставки

Особливу увагу привертають так звані природні або напівмодифіковані системи. У таких випадках мікроводорості вирощуються у природних або штучно створених водоймах з мінімальним технологічним втручанням.

Прикладами природних та напівприродних водних ставків є:

Озера в регіоні Чад (Африка), де майже чисті культури *Arthrospira platensis* ростуть завдяки високій лужності води (Abdulqader et al., 2000). Кратери в М'янмі, заповнені лужною водою, де ціанобактерії вирощуються майже безперервно.

23 https://www.researchgate.net/figure/figure4-Open-ponds-for-mass-culture-of-microalgae-Race-way-and-circular-with-paddle_fig4_272510032

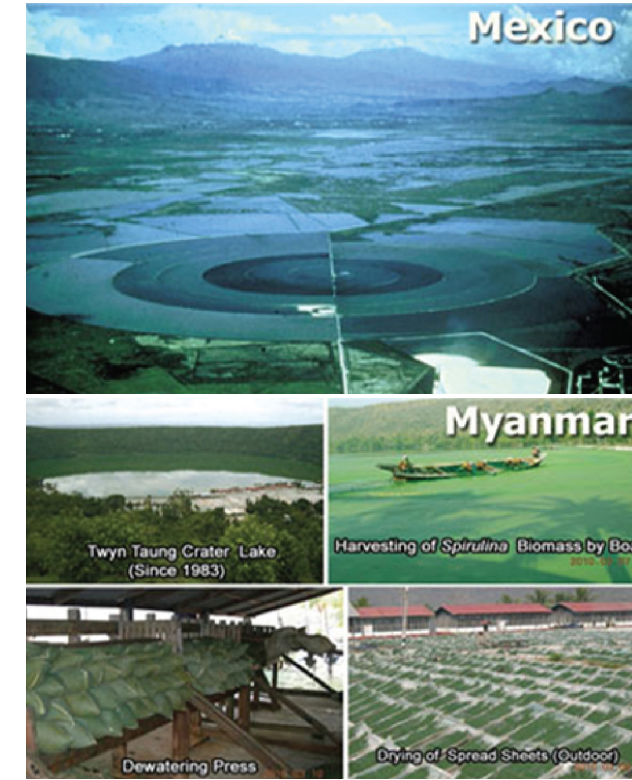


Рис. 2.2 – Caracol (Spirulina Mexicana) на озері Тескоко поблизу Мехіко. Збирання, зневоднення та сушіння спіруліни в М'янмі. Надано Min Thein²⁴

Система Caracol у Мексиці — штучна спіралеподібна лагуна площею понад 900 гектарів, яка раніше виробляла до 300 тонн спіруліни щорічно (Рис. 2.2).

Лагуни *Dunaliella salina* в Австралії — наприклад, Hutt Lagoon та Whyalla, площею ставків 250–460 гектарів та річним виробництвом 6–10 тонн β-каротину.

У таких системах продуктивність значно нижча (0,5–1 г/м²/добу), проте вони залишаються економічно привабливими завдяки **низьким експлуатаційним витратам**.

Матеріали для конструкцій

Матеріали, що використовуються у відкритих системах, варіюють від глини та піску до бетону та полімерів (наприклад, ПВХ або поліетиленових підкладок). Вибір матеріалу суттєво впливає на **довговічність, вартість та ризик контамінації**. Невстелені ставки знижують витрати, але призводять до витоків, змішування з осадами і контамінації, що робить такі конструкції менш практичними для більшості застосувань.

24 <https://smartmicrofarms.com/spirulina/5-cultivation-worldwide/>

Переваги відкритих ставків:

Низькі капітальні вкладення.
Простота експлуатації.
Можливість масштабування.
Високе проникнення світла.

Обмеження:

Обмежений контроль навколишніх параметрів (рН, температура, контамінація);

Випаровування води та втрати CO₂;

Високі витрати на збір біомаси через низьку щільність культури.

Відкриті системи культивування залишаються ключовою технологією у промисловості виробництва мікроводоростей, особливо в регіонах із сприятливими кліматичними умовами. Вибір між **raceway-системами, нахиленими поверхнями або природними лагунами** залежить від співвідношення витрати/вигода, цільового продукту та наявних ресурсів. Необхідна подальша оптимізація, особливо у **мінімізації втрат води, покращенні гігієни культури та підвищенні енергоефективності**.

Закриті системи культивування (фотобіореактори)

Закриті системи для культивування мікроводоростей, зокрема фотобіореактори (ФБР), є ключовими технологіями для отримання високоякісної біомаси в контрольованих умовах. Їх використання забезпечує ізоляцію культур від зовнішнього середовища, мінімізуючи ризики забруднення, дозволяючи точно контролювати параметри росту (світло, температуру, газообмін, рН тощо) та підвищуючи ефективність використання ресурсів.

Загальна конструкція трубчастих фотобіореакторів

Трубчасті ФБР є найпоширенішим типом закритих систем, що впроваджуються в промислових масштабах (Torzillo & Zittelli, 2015). Зазвичай вони складаються з прозорих полімерних або скляних трубок діаметром 5–10 см, розташованих горизонтально, вертикально або у формі спіралі. На рисунку 2.3 показано комерційну установку колекторного типу з вертикальними фотобіореакторами.

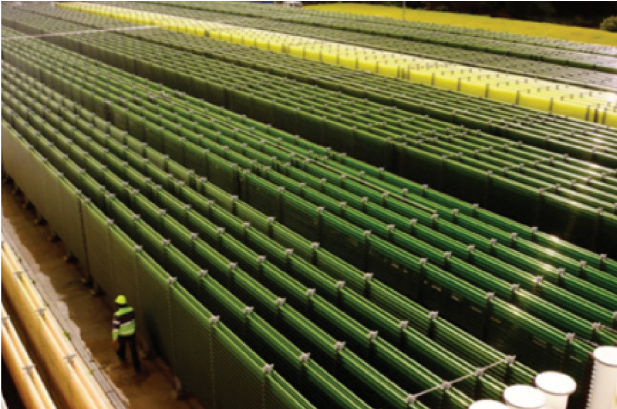


Рис. 2.3 – Фотобіореактори з трубчастими колекторами: комерційна установка з вертикальними реакторами в A4F-Algae for Fuel, S.A., Патайяс (Португалія)⁷¹

Культури мікродоростей циркулюють по трубах за допомогою насосів або систем ерліфту. Співвідношення поверхні до об’єму (S/V) у таких системах може досягати 80 м⁻¹, що сприяє високій продуктивності біомаси. Система зазвичай складається з двох основних частин: фотозони, де відбувається фотосинтез, та резервуара для змішування, який видаляє надлишок кисню, стабілізує температуру та pH, а також сприяє подаче CO₂.

Типи трубчастих фотобіореакторів

Серпантинні ФБР є найстарішим типом трубчастих систем, де трубки з’єднані U-подібними вигинами, утворюючи плоскі петлі. Відомим прикладом є горизонтальний двохаровий реактор об’ємом 4000 літрів з 400 м трубопроводів, встановлений в Альмерії, Іспанія. Сучасні модифікації включають вертикальні конструкції, що охолоджуються через теплообмінники або водяні ванни. Інноваційний підхід був розроблений компанією

Microphyt (Франція), яка представила реактор з двофазною циркуляцією – «вітряний, хвилястий і витертий» ФБР, що дозволяє вирощувати навіть чутливі штами.

Колекторні (гребінчасті) ФБР використовують трубки, з’єднані між двома колекторами – вхідним та вихідним. Наприклад, компанія Roquette Klötze (Німеччина) експлуатує вертикальні колекторні ФБР з 500 км трубопроводів, виробляючи близько 40 тонн біомаси хлорели щорічно. Основні переваги включають менші втрати тиску, знижену концентрацію кисню та легшу масштабованість.

Спиральні ФБР складаються з трубок малого діаметра, скручених навколо вертикальної рами. Вони дозволяють оптимально використовувати простір, але створюють труднощі, пов’язані з гідродинамічним навантаженням та очищенням. Прикладом є система Biosoil, протестована на пілотному рівні з морськими видами та *Arthrospira*.

Оцінка ефективності трубчастих ФБР

Трубчасті ФБР забезпечують отримання високоякісної біомаси для фармацевтичної, харчової та косметичної промисловості. Висока продуктивність досягається завдяки ретельному контролю діаметра трубок, довжини петель та швидкості циркуляції. Наприклад, діаметр трубки 5–9 см забезпечує оптимальний світловий режим та концентрацію клітин. Вплив діаметра трубки на продуктивність культур *A. platensis* у трубчастих ФБР наведено в таблиці 2.2.

Оптимальною вважається довжина трубки 100–150 м. У довгих каналах виникають проблеми з перемішуванням, оскільки час змішування зростає з довжиною трубки. Це слід враховувати під час масштабування, щоб

забезпечити рівномірний розподіл поживних речовин (Torzillo & Zittelli, 2015). Тому трубчасті ФБР не можна масштабувати нескінченно – на великих установках необхідно використовувати модульні реактори замість надто довгих трубок (Eriksen, 2008). Такий підхід є досить витратним, оскільки кожен модуль потребує окремих систем для контролю різних факторів росту (Kunjapur & Bruce Eldridge, 2010).

Середнє енергоспоживання становить від 10 до 100 Вт/м². Основні обмеження включають високі інвестиційні витрати (до €0,51 млн/га) та необхідність безперервного енергозабезпечення для циркуляції культури.

Вирощування у трубчастих системах у великому масштабі є перевіреною та надійною технологією для ведення виробництва за умов суворого контролю та автоматизації. Проте через високі інвестиційні та енергетичні витрати ці системи підходять для продуктів з високою доданою вартістю та виробництва інокуляту, але не для дешевих масових товарів.

Вертикальні колонні фотобіореактори та системи рукавного типу

Вертикальні трубчасті реактори (або колонні фотобіореактори) належать до найпростіших закритих систем для культивування мікродоростей, де перемішування здійснюється шляхом барботування повітря. Перші такі установки були розроблені у Стенфордському університеті (США) у 1940-х роках (Cook, 1950). Ці скляні реактори мали висоту 1,8 м та діаметр 10 см, зі звуженою нижньою частиною для запобігання осіданню клітин. В умовах внутрішнього культивування продуктивність хлорели становила 0,48 г/л/добу, тоді як на відкритому повітрі середня продуктивність дорівнювала 0,28 г/л/добу, з максимумом у 0,35 г/л/добу. Зниження ефективності на відкритому повітрі було зумовлене великим кутом нахилу відносно сонячного випромінювання, що призводило до значних втрат світла через відбиття.

Дослідники (Miyamoto та ін., 1988) експериментували з недорогими промисловими скляними трубками (2,35 м заввишки, 5 см у діаметрі) та досягли продуктивності 0,6 г/л/добу для *Nostoc* та *Anacystis*. Використовуючи подібний підхід, Hu і Richmond (1994) досягли ще вищої продуктивності – 1,6 г/л/добу – під час культивування *Isochrysis galbana*.

Сучасні жорсткі вертикальні реактори, що застосовуються в інкубаторах для годування личинок молюсків і риб, зазвичай мають висоту від 2 до 2,5 м та діаметр 30–50 см. Вони виготовляються з напівпрозорого скловолокна та змішуються за допомогою повітря.

Прості рукавні реактори виготовляють із прозорої поліетиленової трубки, запаяної з одного боку. Їх підвішують на каркасі та аерують повітрям. Такі системи можна використовувати як у приміщенні з штучним освітленням, так і на відкритому повітрі. Незважаючи на короткий термін експлуатації (через біообростання), рукавні реактори легко та недорого замінюються. У місті Беер-Шева (Ізраїль) такі реактори застосовували для культивування *Porphyridium* та *Dunaliella*, досягаючи вищої продуктивності порівняно з відкритими ставками (Cohen & Arad (Malis), 1989).

Основними недоліками рукавних реакторів є низьке співвідношення поверхні до об’єму (S/V) та інтенсивне забруднення стінок. Прикладом удосконаленої вертикальної системи є концентричний аерліфт-реактор, розроблений в Університеті Альмерії (Іспанія) (2 м заввишки, 9,6 см у діаметрі), який використовувався для вирощування *Phaeodactylum tricornutum* (García Camacho та ін., 1999). Він продемонстрував ефективність, співмірну з горизонтальними системами.

Особливу увагу варто приділити системам з внутрішнім освітленням, де циліндр освітлюється зсередини за допомогою люмінесцентних ламп. Такі системи досягають вищої продуктивності завдяки ефективнішому поглинанню фотонів. Наприклад, у Флоренції (Італія) була розроблена кільцеподібна система з двох циліндрів із плексигласу, що утворювали камеру для культури товщиною 3–5 см і об’ємом 120–150 л. Газообмін забезпечувався ін’єкцією суміші повітря та CO₂, а внутрішнє освітлення значно підвищувало ефективність фотосинтезу⁷¹.

Особливості плоскості панельних фотобіореакторів

Типовий фотобіореактор (ФБР) є трифазною системою, яка включає рідку фазу (культуральне середовище), тверду фазу (клітини мікродоростей) та газову фазу (CO₂, O₂, N₂). Світло іноді розглядається як четверта фаза. Розробка ефективного ФБР вимагає розуміння

Таблиця 2.2. Вплив діаметра трубки на продуктивність *A. platensis* у трубчастих ФБР ³⁰

Діаметр трубки, см	Об’єм на одиницю площі, л/м²	Поверхнева щільність, г/м²	S/V, м ⁻¹	Оптимальна концентрація біомаси, г/л	Об’ємна продуктивність, г/(л·добу)	Площинна врожайність, г/м²/добу
14	110	50–70	9	0.4–0.6	0.20	22
13	102	60–80	10	0.6–0.8	0.23	23
7.4	58	70–80	17	1.2–1.4	0.40	23
5	39	70–90	25	1.4–2.0	0.65	25
2.5	19.6	70–120	50	3.5–6.0	1.40	27

взаємодії між параметрами середовища та біологічних аспектів²⁵.

Базова конструкція плоскопанельних ФБР складається з двох паралельних пластин із тонким шаром суспензії водоростей між ними. Ефективне проходження світла зазвичай досягається при товщині шару в кілька сантиметрів. Пластини ФБР зазвичай виготовляють із полівінілхлориду, полікарбонату, поліметилметакрилату, скла або поліетилену. Основною перевагою плоскопанельних ФБР є високе співвідношення площі поверхні до об'єму. На рисунку 2.4 зображено пілотну установку плоскопанельного ФБР (1,5 м заввишки, 10 м завдовжки, 0,10 м завширшки), розташовану в Токопільї (Чилі) на території теплоелектростанції Е-CL.

Плоскопанельні фотобіореактори демонструють продуктивність мікродоростей на рівні 5–15 г/(м²•доба), хоча при використанні стічних вод як культурального середовища досягалися значення до 35 г/(м²•доба)²⁶.



Рис. 2.4 – Пілотна система плоскопанельного фотобіореактора (1,5 м висота, 10 м завдовжки, 0,10 м завширшки), розташована в Токопільї, Чилі, на території теплоелектростанції Е-CL ⁷¹

Ці системи можуть досягати високої фотосинтетичної ефективності. Втім, вони також мають певні обмеження. Через компактну конструкцію вони зазнають значних коливань температури та перегріву культури. Зазвичай плоскі ФБР охолоджуються шляхом розпилення води по їхній поверхні, яку можна зібрати для повторного використання.

Щоб максимізувати продуктивність мікродоростей, зона світлового насичення має бути рівномірно розподілена по всьому об'єму ФБР — що є викликом для масштабних систем. Перемішування забезпечує циркуляцію клітин водоростей між зонами, знижуючи фотоінгібування на освітленій поверхні та втрати біомаси в темній зоні ²⁷.

Фотобіореактори за своєю природою мають світловий градієнт, зумовлений поглинанням світла та взаємним затіненням клітин. Світловий режим визначається цим градієнтом і швидкістю циркуляції рідини. Усередині об'єму біореактора одночасно можна виокремити кілька зон із різною інтенсивністю освітлення: повну темряву, світлове обмеження, світлове насичення та світлове пригнічення. Зони темряви та фотопригнічення є несприятливими для росту водоростей.

Інтенсивність падаючого світла, яку зазвичай використовують як індикатор, слабо відображає реальні світлові умови в ФБР. Кращим показником є середня інтенсивність світла, що ґрунтується на припущенні, що клітини водоростей упродовж коротких інтервалів перемішування зазнають дії різних рівнів освітлення — що фактично еквівалентно постійному впливу середньої інтенсивності світла.

Створення сприятливих світлових умов у ФБР вимагає максимізації співвідношення освітленої поверхні до об'єму (S/V), яке є ключовим параметром. Залежність продуктивності біомаси від співвідношення V/S наведена на рис. 1 (V — у літрах, S — у м²).

Масштабування від лабораторних установок до промислових систем є серйозним викликом. Для великомасштабних ФБР рекомендується концентрація мікродоростей вище 1,0 г/л. Концентрація біомаси суттєво впливає на економіку процесу та розмір реактора: що вища концентрація біомаси, то менший потрібний об'єм реактора. Оптимальне співвідношення S/V для різних типів ФБР становить 43–73 м²/м³. Вищі значення S/V можуть призвести до фотоінгібування та перегріву культури ³³.

У таблицях 2.3 і 2.4 наведено результати розрахунків продуктивності вирощування біомаси мікродоростей для різних розмірів установок і співвідношень V/S, на основі даних, поданих на рис. 2.5.

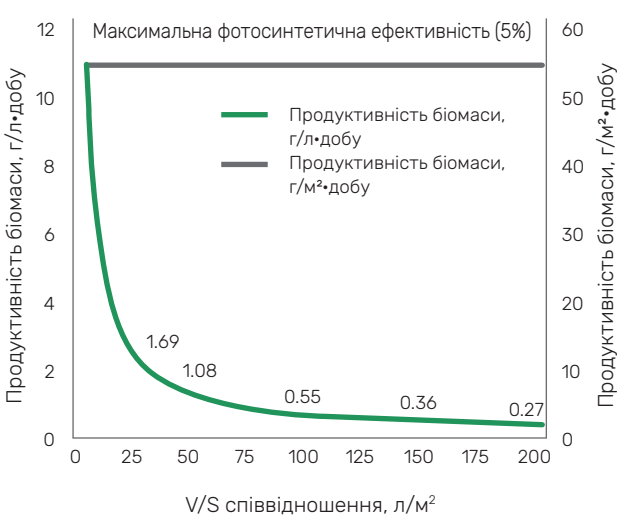


Рис. 2.5 – Продуктивність біомаси мікродоростей при різному співвідношенні V/S у плоско-панельних фотобіореакторах ²⁸

Таблиця 2.3. Продуктивність біомаси на граничних співвідношеннях поверхні до об'єму²⁸

S/V (м²/м³)	V/S (л/м²)	Продуктивність (г/(л•добу))
43	23	2
73	13	6

28 https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria

Згідно з вимірюваннями А.А. Циганкова (2001), при концентрації клітин лише 0,6 г сухої біомаси на 1 л для *Anabaena variabilis* шар культури завтовшки 1 см поглинає 90% падаючого світла, і лише 1% доходить на глибину 2 см. За вищих концентрацій світло послаблюється ще швидше. Це чітко видно на вимірюваннях зниження щільності потоку фотонів із глибиною у культурі *Euglena gracilis*. Тому перші спроби використовувати ємності з товстим (>5 см) шаром культури для вирощування мікродоростей призводили до дуже низької врожайності біомаси ²⁹.

Кожна культура має оптимальну товщину плоскопанельного реактора, що врівноважує світловий дефіцит у глибших шарах та надлишкове освітлення на поверхні. Двостороннє освітлення може подвоїти продуктивність культури.

Ризики біообростання та зовнішнього забруднення можна зменшити або навіть мінімізувати завдяки використанню одноразових плоско-панельних реакторів, що суттєво знижує витрати. Однією з таких систем є запатентований реактор *Green-Wall*. Його конструкція складається з гнучкого прозорого поліетиленового мішка, розташованого між двома жорсткими металевими рамами, що утворюють тонку вертикальну панель. Установка площею 400 м² із 18 плоских реакторів (по 1,5 м³ кожен) була змонтована у Токопільї (Чилі) (рис. 2.4) та підключена до електростанції для використання димових газів як джерела вуглецю для виробництва мікродоростей ⁷¹.

29 F. Fasaei, J.H. Bitter, P.M. Slegers, A.J.B. van Bortel. Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. Volume 31, April 2018, Pages 347–362.

Таблиця 2.4. Продуктивність фотобіореакторів різних розмірів

Фотобіореактор	Розмір (м)	Об'єм (л)	Площа (м²)	V/S (л/м²)	Продуктивність біомаси г/(л•добу)
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
Вертикальна плоска панель (двостороннє освітлення)	100×100×0.01	100 000	20 000	5	10

25 Clemens Posten. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. Engineering in Life Sciences.Vol 9. Issue3.2009.

26 [\[PDF\] Microalgal Heterotrophic and Mixotrophic Culturing for Bio-refining: From Metabolic Routes to Techno-economics](#)

27 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926417306677>

Перспективні напрями розвитку фотобіореакторів

Подальший розвиток систем фотобіореакторів для мікроводоростей відбуватиметься у трьох основних напрямках:

- I. Удосконалення існуючих технологій культивування
- II. Масштабування виробничих процесів
- III. Індустріалізація виробництва біомаси мікроводоростей

Ключовим пріоритетом є підвищення ефективності біологічних систем за рахунок покращеного контролю параметрів середовища (рН, температура, освітлення, насичення газами) та максимізації використання світлової енергії. Це також передбачає зниження капітальних та експлуатаційних витрат, зокрема за рахунок використання недорогих будівельних матеріалів і малопотужних систем циркуляції культури.

У контексті масштабування існує нагальна потреба у встановленні критеріїв масштабування та адаптації відповідного обладнання для стабільної та безпечної роботи на великих площах. Доцільно застосовувати технологічні рішення з суміжних галузей, таких як очищення стічних вод чи молочна промисловість.

Особливу увагу варто приділяти контролю забруднень, що є критично важливим для відкритих систем, а також стабільності культур. Для закритих реакторів головною проблемою залишається біообростання внутрішніх поверхонь, яке періодично призводить до втрати культури.

Хоча глобальне виробництво мікроводоростей швидко зростає, лише синергійний розвиток цих напрямів дозволить здійснити масштабування у промислових масштабах та утвердити мікроводорості як повноцінну сировинну базу для біоекономіки.

Основні технологічні параметри процесу культивування

Культивування

Культивування мікроводоростей є дуже чутливим біотехнологічним процесом, що ґрунтується на ретельному контролі фізико-

хімічних параметрів. Швидкість фотосинтезу, поглинання поживних речовин і накопичення біомаси безпосередньо залежать від температури, кислотності, рівня освітлення та вмісту розчинених газів і поживних компонентів. Відповідно, точне дотримання оптимальних значень кожного параметра дозволяє досягати стабільного та інтенсивного росту культури, що є критично важливим для подальшого використання мікроводоростей.

Мікроводорості мають високу адаптивну здатність, однак їхній розвиток обмежується низкою біофізичних закономірностей. Тому навіть незначні відхилення від рекомендованих умов можуть суттєво знизити продуктивність процесу. Контроль цих параметрів є одним із ключових чинників ефективності всієї технології. У цьому розділі систематизовано основні параметри, що впливають на продуктивність культивування, із зазначенням їх оптимальних діапазонів.

Температура

Це один із найважливіших параметрів, що впливає також на інші показники. Від температури залежить розчинність CO₂ та O₂ у воді. Крім того, вона визначає активність ферментів, що містяться у клітинах та беруть участь у процесах фотосинтезу й синтезу клітинних компонентів.

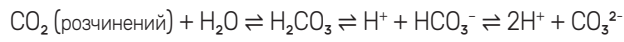
Мікроводорості здатні рости в температурному діапазоні від 5 до 40 °С, проте кожен вид має власну оптимальну температуру росту. Для більшості мікроводоростей цей показник становить 20–30 °С. Підвищення температури вище граничного рівня викликає температурний стрес, який пригнічує роботу ферментів і фотосинтетичного апарату, а при тривалому впливі призводить до незворотної денатурації білків і загибелі клітин. З іншого боку, зниження температури спричиняє уповільнення метаболізму та зменшення приросту біомаси, а при зниженні до 0 °С і нижче вода всередині клітин кристалізується й руйнує їх із середини.

З огляду на кліматичні умови України, річні температурні коливання є значними. У літні місяці в окремих регіонах температура повітря може досягати +35...+38 °С, що призведе до перегрівання фотобіореакторів. У холодний період, особливо при зниженні температури до –18 °С, виникає постійна потреба в підігріві фотобіореакторів.

рН середовища

Цей показник суттєво впливає на метаболізм мікроводоростей, а також на доступність поживних речовин і CO₂. Для більшості мікроводоростей оптимальне значення рН перебуває в межах 6,0–9,0. Під час культивування рН може змінюватися: зазвичай воно зростає у світлий період через поглинання неорганічного вуглецю та його використання для фотосинтезу, і знижується у темний період через виділення CO₂ під час дихання³⁰.

рН також впливає на форму існування неорганічного вуглецю у поживному середовищі. При розчиненні CO₂ у середовищі він може перебувати у трьох формах: вільний CO₂, HCO₃⁻ та CO₃²⁻. Це можна описати рівнянням:



При рН < 6 переважає розчинений CO₂. У діапазоні 6,0–8,0 домінують CO₂ (розчинений) та HCO₃⁻. При рН 7,5–9,0 переважають HCO₃⁻ та CO₃²⁻. При рН > 9 концентрація HCO₃⁻ зменшується, а домінує CO₃²⁻. Мікроводорості можуть засвоювати як розчинений CO₂, так і HCO₃⁻, проте не здатні споживати CO₃²⁻³¹.

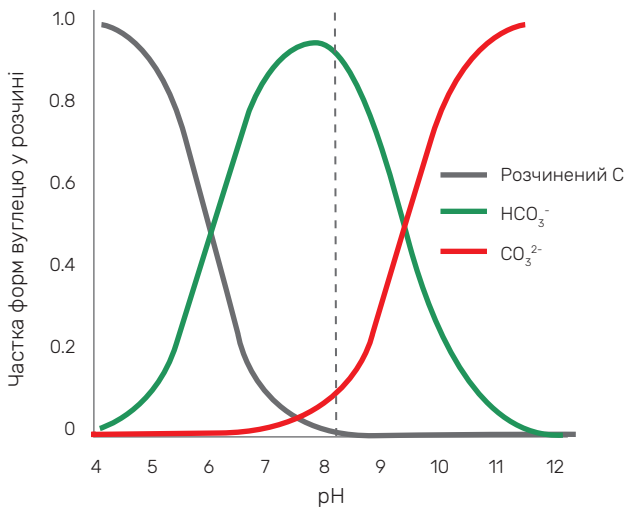


Рис. 2.6 – Залежність співвідношення різних форм вуглецю від рівня рН³²

30 Hawrot-Paw M, Szaśadek M. Optimization of Microalgal Biomass Production in Vertical Tubular Photobioreactors. Energies. 2023; 16(5):2429. <https://doi.org/10.3390/en16052429>

31 Sun, Z.; Bo, C.; Cao, S.; Sun, L. Enhancing CO₂ Fixation in Microalgal Systems: Mechanistic Insights and Bioreactor Strategies. Mar. Drugs 2025, 23, 113. <https://doi.org/10.3390/md23030113>.

32 <https://andthentheresphysics.wordpress.com/2016/11/02/ocean-co2-uptake-part-2/>

Цей показник можна регулювати кількома способами: в автоматичному режимі дозувати розчини кислот або лугів; у разі підвищення рН – збільшувати подачу CO₂ у середовище; або ж застосовувати NaHCO₃ та інші буферні речовини.

Освітлення

Цей параметр є ключовим у фотосинтезі, адже світло є основним джерелом енергії для клітин при автотрофному та міксотрофному культивуванні. Інтенсивність освітлення, спектральний склад світла та фотоперіод безпосередньо впливають на ефективність культивування і біохімічний склад мікроводоростей.

Мікроводорості здатні поглинати лише частину сонячного випромінювання – так зване фотосинтетично активне випромінювання, що відповідає видимому діапазону довжин хвиль від 400 до 700 нм. Це відбувається завдяки фотосинтетичним пігментам, які містяться у клітинах. Так, хлорофіл-а поглинає переважно у діапазонах 380–470 нм і 600–680 нм, хлорофіл-б – у межах 410–480 нм, -каротин – 400–500 нм, а фікоціанін – 600–640 нм. Саме тому серед штучних джерел освітлення в промислових і дослідницьких системах найчастіше застосовують LED-лампи. Мікроводорості здатні змінювати кількісний склад своїх пігментів, пристосовуючись до різних умов освітлення⁶.

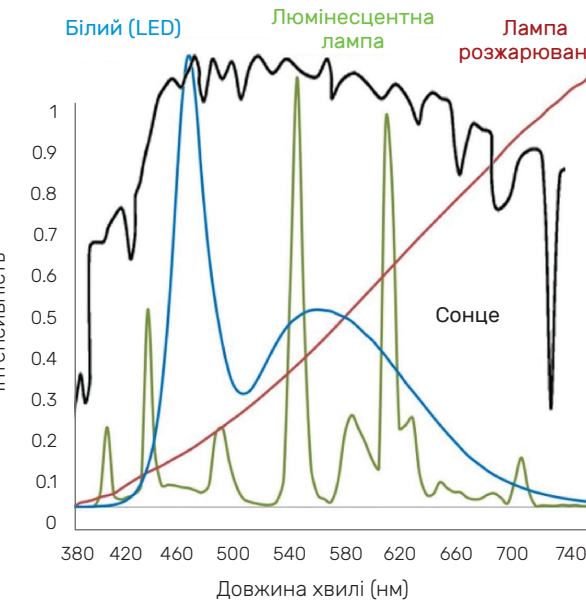


Рис. 2.7 – Порівняння спектрів випромінювання різних джерел світла³³

33 <https://blog.drwill.com/led-lights-might-pose-a-hazard-for-vision/>

Окрім спектрального складу світла, важливою є й його інтенсивність, яка безпосередньо визначає процес фотосинтезу. У контексті фотосинтетично активного випромінювання йдеться про кількість мікромолів фотонів, що падають на квадратний метр за секунду. Оптимальна інтенсивність світла для росту мікроводоростей значною мірою залежить від виду і зазвичай становить приблизно 100–500 мкмоль фотонів/(м²•с)³⁴.

Значення нижче оптимального призводять до обмеження фотосинтезу через дефіцит світлової енергії, тоді як надлишкове світло викликає фотопригнічення. Це зумовлене пошкодженням фотосистем, надмірним утворенням активних форм кисню та перерозподілом енергії на захисні механізми замість росту клітин.

Також слід враховувати взаємозв’язок між інтенсивністю освітлення та щільністю культури. У культурах із високою концентрацією біомаси світло поглинається переважно клітинами зовнішнього шару, тоді як клітини внутрішніх залишаються затіненими. Тому часто застосовують кероване освітлення: інтенсивність підвищують у міру зростання концентрації біомаси або забезпечують рівномірне перемішування.

Фотоперіод. Не менш важливим чинником є співвідношення світлової та темної фаз. Найчастіше застосовуються фотоперіоди 16:8 та 12:12 (день:ніч)³⁵. Наявність темної фази є критичною для життєдіяльності клітин. За правильного налаштування фотоперіоду клітини мікроводоростей синхронізують свій циркадний ритм: у світлу фазу вони ростуть і накопичують крохмаль шляхом фотосинтезу, а в темну — використовують його для розмноження³⁶. Крім того, у темній фазі відбувається окиснення фотосистеми, що запобігає фотопригніченню клітин.

Порушення співвідношення день:ніч призводить

до хаотичних проявів: клітини починають ділитися вдень, що вимагає певного часу, протягом якого фотосинтез не відбувається, тому ефективність поглинання світла і CO₂ істотно знижується.

Солоність. Солоність є важливим фактором, особливо у відкритих системах культивування, де концентрація солей у середовищі може змінюватися внаслідок випаровування. Залежно від виду, мікроводорості мають різну чутливість до концентрації солей. За рівнем толерантності їх поділяють на три основні групи³⁷:

Олігогалінні — ростуть у слабосолонуватій воді з максимальною концентрацією солей від 0,5 до 5 г/кг.

Мезогалінні — адаптовані до життя у воді з концентрацією солей 5–18 г/кг.

Полігогалінні — витримують високу солоність із концентрацією солей 18–30 г/кг.

Перевищення оптимальної солоності призводить до осмотичного стресу. У відповідь клітини мікроводоростей зазнають біохімічних змін: зростає утворення ліпідів (як енергетичного резерву і захисту від активних форм кисню), тоді як вміст білків і хлорофілу суттєво знижується через пригнічення фотосинтезу. Для компенсації посилюється синтез каротиноїдів, а також накопичуються розчинні цукри. Такі зміни дозволяють мікроводоростям тимчасово адаптуватися до несприятливих умов, проте супроводжуються значним зниженням темпів росту аж до його повного припинення.

У контексті використання дигестату як поживного середовища рівень солоності має особливе значення. Дигестат може містити підвищену кількість хлору, натрію, сульфатів, калію, магнію, броду та інших іонів, що впливають на солоність середовища та підвищують осмотичний тиск. Щоб уникнути інгібування росту, доцільно попередньо розбавляти дигестат водою¹².

Вміст поживних речовин. Для культивування мікроводоростей необхідно забезпечити наявність макро- і мікроелементів у формі, доступній для засвоєння клітинами. Загальна

інформація про необхідні поживні речовини наведена в табл. 2.5.

Відсутність хоча б одного з елементів призведе до зниження темпів росту біомаси відповідно до закону мінімуму Лібіха. Водночас надлишок амонію (NH₄⁺) або нітриту (NO₂⁻) може спричинити інгібування чи загибель клітин³⁸. Тому поживне середовище має бути збалансованим і адаптованим до конкретного виду мікроводоростей та умов культивування.

Сучасні дослідження^{39, 40} підтверджують, що дигестат із біогазових установок може використовуватись як частина поживного середовища завдяки високому вмісту макро- та мікроелементів, необхідних для мікроводоростей.

38 Markou, G., Vandamme, D., & Muylaert, K. Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients. Water Research 2014, 65, 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.025>

39 Resman L, Berden Zrimec M, Žitko V, Lazar B, Reinhardt R, Cerar A, Mihelič R. Microalgae Production on Biogas Digestate in Sub-Alpine Region of Europe—Development of Simple Management Decision Support Tool. Sustainability. 2023; 15(24):16948. <https://doi.org/10.3390/su152416948>

40 Nagarajan D, Lee DJ, Chang JS. Integration of anaerobic digestion and microalgal cultivation for digestate bioremediation and biogas upgrading. Bioresour Technol. 2019;292:121804. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.12.1804>

Проте концентрації деяких речовин можуть спричиняти інгібування. Тому застосування дигестату вимагає постійного моніторингу його складу та попередньої обробки.

Вміст розчинених CO₂ та O₂. Вуглець є одним із ключових елементів, необхідних для росту клітин. Оскільки концентрація CO₂ в атмосфері є недостатньою для інтенсивного росту культур, застосовується штучне збагачення поживного середовища. Його можна вносити як у вигляді неорганічних солей карбонатів і бікарбонатів, так і у вигляді газоподібного CO₂. Особливий інтерес становить другий спосіб — використання CO₂ із біогазових установок для виробництва біометану, що дозволяє одночасно зменшити вуглецевий слід⁴².

Різні види мікроводоростей мають власні оптимальні концентрації CO₂, при яких їхній ріст є максимальним. Недостатній вміст CO₂ обмежує фотосинтез і знижує продуктивність культури. Надлишковий вміст створює стресові умови, що можуть спричинити закиснення

42 Geletukha, G., Hyvel, M., & Kucheruk, P. (2024). OPPORTUNITIES OF ADVANCED BIOMETHANE PRODUCTION FROM MICROALGAE GROWN ON BIOGAS PLANT DIGESTATE. Part 1. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 46(4), 60–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.7>

Таблиця 2.5 – Необхідні поживні речовини для культивування мікроводоростей ⁴¹

Компонент	Джерело (поживна речовина)	Функції	Необхідний діапазон концентрацій
Вуглець	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ та ін.	Синтез вуглеводів, білків, ліпідів	1–10 г/л
Азот	NO ₃ ⁻ , сечовина, амоній, N ₂ та ін.	Синтез амінокислот, нуклеїнових кислот, білків, пігментів (хлорофіл, фікоціанін)	10–2000 мг/л
Фосфор	Фосфат, гідрофосфат та ін.	Компонент ДНК і РНК, АТФ, фосfolіпідів, нуклеотидів	10–500 мг/л
Сірка	Сульфати	Синтез амінокислот метіоніну та цистеїну, компонент коферментів	1–200 мг/л
K, Ca, Na, Mg тощо	Неорганічні солі	Підтримання структури клітин і метаболізму	0,1–100 мг/л
Fe, Zn, Mn, Pb, Cd тощо	Неорганічні солі	Фактори-коферменти	0,01–10 мг/л
Фактори росту	Вітаміни B, C, E та ін.	Складова коферментів	0,01–1000 мкг/л

41 Geletukha, H., Hyvel, M., Kucheruk, P., & Sydorenko, M. Opportunities of advanced biomethane production from microalgae grown on biogas plant digestate. Part 2. Thermophysics and Thermal Power Engineering 2025, 47(1), 65–79. <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/617>

34 Palikrousis T, Manolis C, Kalamaras S, Samaras P. Effect of light intensity on the growth and nutrient uptake of the microalga *Chlorella sorokiniana* cultivated in biogas plant digestate. Water. 2024;16(19):2782. <https://doi.org/10.3390/w16192782>

35 Sforza E, Simionato D, Giacometti G, Bertucco A, Morosinotto T. Adjusted light and dark cycles can optimize photosynthetic efficiency in algae growing in photobioreactors. PLoS One. 2012;7(6):e38975. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038975>

36 de Winter L, Cabanelas ITD, Martens DE, Wijffels RH, Barbosa MJ. The influence of day/night cycles on biomass yield and composition of *Neochloris oleoabundans*. Biotechnol Biofuels. 2017;10:104. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0762-8>

37 Chowdury MK, Nahar N, Deb UK. The growth factors involved in microalgae cultivation for biofuel production: A review. Comput Water Energy Environ Eng. 2020;9(4):185–215. <https://doi.org/10.4236/cweee.2020.94012>

середовища. Такий стрес підвищує накопичення ліпідів у клітинах, проте значно знижує приріст біомаси⁴³.

Не менш важливим є вміст розчиненого кисню. Під час фотосинтезу мікроводорості активно продукують O₂, що призводить до його накопичення, особливо у замкнених фотобіореакторах. При концентрації понад 10 мг/л виникають несприятливі умови: посилюється утворення активних форм кисню, а ключовий фермент RuBisCO починає взаємодіяти з O₂ замість CO₂, що суттєво знижує ефективність фотосинтезу та швидкість росту. Оптимальний діапазон вмісту розчиненого кисню для багатьох видів мікроводоростей становить 2–10 мг/л⁴⁴.

Збирання та зневоднення біомаси мікроводоростей

Загальна характеристика

Збирання біомаси є не менш важливим етапом, ніж вирощування. Саме ефективність цієї стадії значною мірою визначає економічну доцільність використання мікроводоростей. За оцінками⁴⁵, на збирання припадає 20–30% усіх витрат. Це зумовлено високим енергоспоживанням та необхідністю переробки великих обсягів культуральної рідини.

Важливими критеріями є не лише ефективність відокремлення, а й якість отриманої біомаси: залишки флокулянтів, надмірна вологість чи пошкодження клітин негативно впливають на подальшу переробку. Морфологічні властивості мікроводоростей — розмір, форма, будова клітинної стінки, наявність слизового шару, електричний заряд — визначають придатність того чи іншого методу.

Більшість мікроводоростей мають розміри від 0,2 до 30 мкм⁴⁶, що значно знижує ефективність природної седиментації (відповідно до закону Стокса швидкість осадження пропорційна квадрату діаметра клітин). Крім того, щільність клітин близька до щільності води, а негативний заряд поверхні клітин створює електростатичне відштовхування, ускладнюючи агрегацію. У деяких видів додатковим бар'єром є позаклітинний слиз, який збільшує в'язкість суспензії, знижує швидкість фільтрації та осадження⁴⁷.

Ще однією проблемою є наявність позаклітинного слизу у деяких видів мікроводоростей, який складається з полімерних речовин. Він збільшує в'язкість суспензії, знижує ефективність фільтрації через закупорювання мембран, а також погіршує седиментацію клітин³.

Таким чином, характеристики мікроводоростей роблять їх збір складним завданням. Саме тому, перш за все, вибір методів збирання та зневоднення повинен базуватися на характеристиках виду, а вже потім на отриманні цільового продукту.

Флокуляція.

Ґрунтується на нейтралізації негативного заряду клітин за допомогою флокулянтів, що призводить до утворення великих агломератів. Ефективність становить 80–100%⁵² і залежить від виду мікроводоростей, наявності слизового шару, pH середовища та режиму перемішування. На практиці використовується кілька типів флокуляції: хімічна, біофлокуляція та електрофлокуляція.

Хімічна флокуляція є найпростішою у використанні, вона ґрунтується на застосуванні неорганічних солей алюмінію чи заліза та синтетичних або природних полімерів. Хоча неорганічні флокулянти є дешевими й комерційно доступними, їх необхідно використовувати у високих концентраціях —

від 120 до 1000 мг/л⁴⁸ і вони можуть залишати іони металів, що негативно впливає на продуктивність мікроводоростей як сировини для процесу анаеробного зброджування. Інші флокулянти забезпечують добру ефективність, потребують значно нижчих концентрацій речовин — від 5 до 50 мг/л⁴, але є набагато дорожчими за неорганічні. Крім того, природні полімери ефективні лише для збору прісноводних мікроводоростей⁵⁴.



Рис. 2.8 – Хімічна флокуляція в лабораторних умовах з використанням хітозану
(Фото авторів АЗ)

Біофлокуляція є альтернативою хімічній флокуляції й працює завдяки виділенню метаболітів, які є флокулянтами, іншими мікроорганізмами під час ко-культивування. Вона не потребує введення додаткових речовин, але сильно залежить від умов культивування. Крім того, цей процес важче контролювати, а ко-культури можуть становити загрозу для нормального перебігу процесу анаеробного зброджування⁴⁹.

48 Branyikova I, Prochazkova G, Potocar T, Jezkova Z, Branyik T. Harvesting of Microalgae by Flocculation. Fermentation. 2018; 4(4):93. <https://doi.org/10.3390/fermentation4040093>

49 Heredia-Martínez LG, Gutiérrez-Díaz AM, Díaz-Santos E. Bio-Flocculation: A Green Tool in Biorefineries for Recovering High Added-Value Compounds from Microalgae. Phycology. 2025; 5(2):19. <https://doi.org/10.3390/phycolgy5020019>

Електрофлокуляція потребує електричного струму як заміни класичних флокулянтів. Вона дозволяє ретельно контролювати процес флокуляції і не залежить від введення сторонніх речовин, але потребує значного споживання електроенергії та постійного очищення електродів, а також має високий ризик вивільнення металів з електродів у отриману біомасу. Цей метод працює значно ефективніше з морськими мікроводоростями, ніж із прісноводними⁵².

У цілому, флокуляція демонструє свою універсальність і часто є першим етапом у багатьох комбінованих методах збору біомаси завдяки своїй простоті, ефективності та масштабованості.

Флотація

Цей метод ґрунтується на концентрації клітин на поверхні культуральної рідини у вигляді пінистого шару за допомогою бульбашок повітря або іншого газу, який піднімає клітини вгору. Через відсутність інтенсивного впливу на клітини флотація вважається перспективною для збору дрібних мікроводоростей, таких як *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, *Nannochloropsis* та інших⁵².

Найпоширенішим типом флотації є розчинена повітряна флотація (DAF). У цій технології повітря розчиняється у культуральній рідині під тиском, після чого тиск у флотаційній ванні знижується до атмосферного, при цьому виділяються дрібні бульбашки повітря діаметром не більше 100 мікрон. Завдяки цьому розміру бульбашки мають велику сумарну поверхню, що забезпечує їх ефективну адгезію до клітин і підняття їх вгору. Цей метод дозволяє збирати від 80 до 90%⁴⁵ загальної маси мікроводоростей.

Альтернативою є флотація з розпиленням повітрям, що полягає у простому подачі повітря через дифузор. Цей метод значно дешевший через нижчі енергетичні витрати та дешевше обладнання, проте бульбашки, що утворюються, мають діаметр понад 100 мікрон, що значно знижує ефективність збору біомаси. Для підвищення ефективності у цій технології проводиться попередня підготовка з використанням флокулянтів, що дозволяє збільшити ефективність збору до понад 90%⁵⁴.

43 Kandasamy LC, Neves MA, Demura M, Nakajima M. The Effects of Total Dissolved Carbon Dioxide on the Growth Rate, Biochemical Composition, and Biomass Productivity of Nonaxenic Microalgal Polyculture. Sustainability. 2021; 13(4):2267. <https://doi.org/10.3390/su13042267>

44 Gao S, Edmundson S, Huesemann M. Oxygen stress mitigation for microalgal biomass productivity improvement in outdoor raceway ponds. Algal Res. 2022;68:102901. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102901>

45 Deepa P, Sowndhararajan K, Kim S. A Review of the Harvesting Techniques of Microalgae. Water. 2023; 15(17):3074. <https://doi.org/10.3390/w15173074>

46 Thangavel P, Sridevi G, eds. Environmental Sustainability. Springer India; 2015. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2056-5_9

47 Roselet F, Vandamme D, Muylaert K, Abreu PC. Harvesting of microalgae for biomass production. Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment. Springer; 2019; 211–243. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8_10

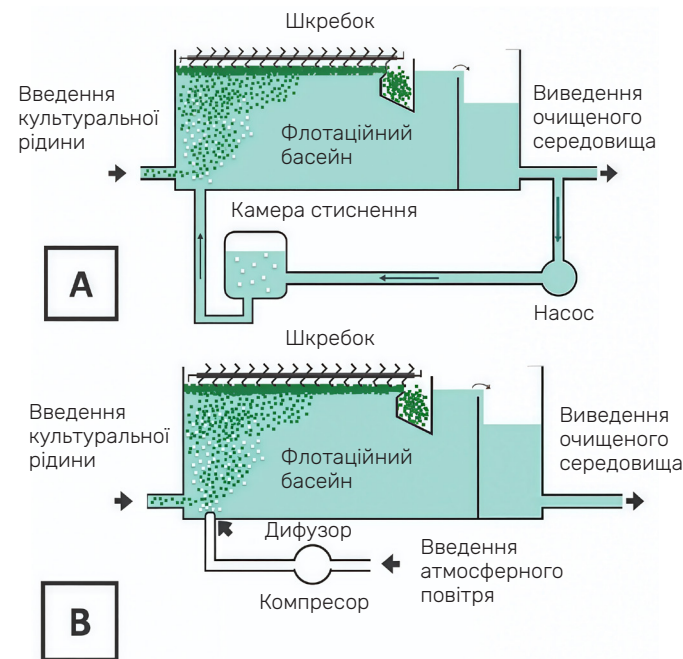


Рис. 2.9 – Принцип роботи флотаційних установок: ⁵⁴
А – Розчинена повітряна флотація
В – Флотація з розпиленням повітря

У порівнянні з DAF, флотація з розпиленням повітря дешевша та простіша в експлуатації, але менш ефективна. DAF забезпечує ефективний збір біомаси за вищими витратами без використання додаткових речовин. Таким чином, флотація може забезпечити високу продуктивність і дозволяє повторно використовувати очищене середовище, що є значною перевагою.

Центрифугування

Центрифугування – це механічний метод збору біомаси, що ґрунтується на дії відцентрових сил і дозволяє ефективно відокремлювати мікроводорості від культуральної рідини. Під час центрифугування клітини рухаються до краю барабана під дією відцентрових сил, утворюючи щільний осад. Цей метод широко використовується як у лабораторних, так і в промислових умовах.

Перевагою центрифугування є висока ефективність – понад 95%⁵², навіть за короткого часу обробки. Цей метод не потребує додавання різних речовин, не залежить від температури чи рН і здатний працювати з культурами різної густини.

Серед недоліків варто зазначити високі енергетичні витрати. Центрифугування також супроводжується нагріванням середовища через високу швидкість обертання і тертя. Крім того, під час інтенсивного обертання відбувається часткове пошкодження клітин ³. Для процесу анаеробного зброджування це є плюсом, але при зберіганні біомаси створює значні ризики.

Цей метод не підходить для деяких мікроводоростей, таких як *Microcystis sp.*, *Anabaena sp.* та *Arthrospira sp.*, оскільки вони мають газові вакуолі, які змушують їх залишатися у вертикальному положенні, що ускладнює збір⁵⁰.

Через високі енергетичні витрати в промисловості цей метод використовується як частина комбінованих методів після флотації або флокуляції для остаточного концентрування біомаси. Такий підхід дозволяє зменшити обсяг культуральної рідини, що підлягає обробці, і знизити загальні витрати на збір мікроводоростей.

Загалом, використання центрифугування потребує ретельного техніко-економічного обґрунтування через високі енергетичні витрати та технологічні особливості, але забезпечує один із найвищих рівнів збору мікроводоростей.

Фільтрація

Фільтрація полягає у відокремленні клітин мікроводоростей від культуральної рідини шляхом пропускання суспензії через пористу мембрану, при цьому клітини затримуються на поверхні та у порах фільтрувального матеріалу, а рідина вільно проходить крізь мембрану.

Цей метод добре відомий і використовується в багатьох галузях промисловості, але його застосування до мікроводоростей має низку особливостей. По-перше, він дозволяє досягати ефективності збору біомаси від 76 до 100%, не потребує додаткових хімічних речовин. Крім того, завдяки різним діаметрам пор мембран фільтрація є високоселективним методом. Вона потребує значно менше електроенергії, ніж центрифугування.

⁵⁰ Pahazri NF, Mohamed R, Al-Gheethi A, Kassim AHM. Production and harvesting of microalgae biomass from wastewater: a critical review. Environmental Technology Reviews. 2016;5(1):39–56. <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1207713>

Проте фільтрація має технічні обмеження: під час експлуатації мембрани забиваються, що знижує продуктивність процесу та постійно потребує промивання або заміни мембран. Морфологія клітин також має значний вплив на процес. Наявність слизового шару уповільнює фільтрацію на початкових етапах, а розмір і форма клітин визначають діаметр пор мембран і градієнт тиску, який потрібно створити⁵¹.

На практиці використовуються два основні типи фільтрації: тупикова (dead-end) та тангенціальна (cross-flow). У тупиковій фільтрації суспензія мікроводоростей пропускається перпендикулярно до мембрани. Ця система дешева і проста, але швидко забивається і більше підходить для невеликих обсягів культуральної рідини з відносно низькою концентрацією біомаси. У поперечній фільтрації суспензія мікроводоростей подається уздовж поверхні мембрани, постійно промиваючи її від забруднення та підтримуючи стабільну швидкість фільтрації. Цей варіант найчастіше використовується на промисловому рівні, хоча його складніше реалізувати.

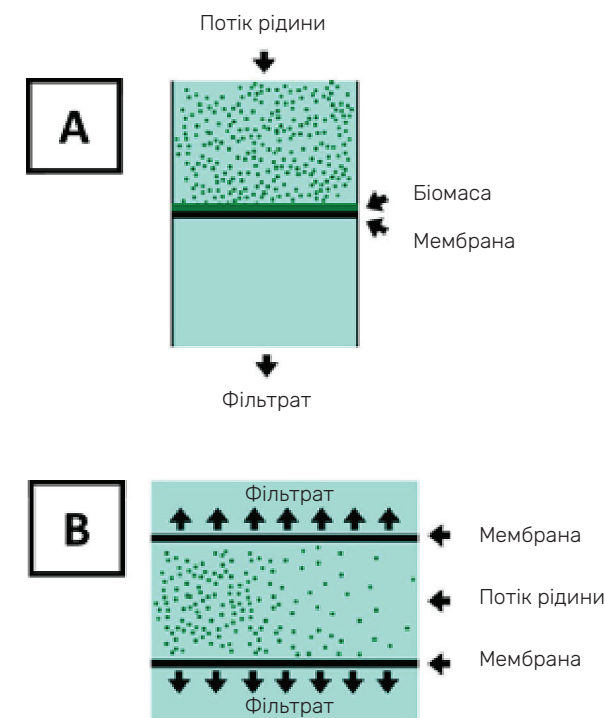


Рис. 2.10 – Принцип роботи фільтраційних установок: ⁵⁴
А – Тупикова (прямотокова) фільтрація
В – Перехресно-потікова фільтрація

⁵¹ Castro-Muñoz R, García-Depraet O. Membrane-Based Harvesting Processes for Microalgae and Their Valuable-Related Molecules: A Review. Membranes. 2021; 11(8):585. <https://doi.org/10.3390/membranes11080585>

Седиментація

Седиментація – найдешевший та дуже простий метод збору мікроводоростей, який ґрунтується на природному осіданні клітин під дією сили тяжіння. Вона не потребує додаткового обладнання або споживання електроенергії, проте ефективність седиментації може досягати від 66 до 97%⁴⁵ і залежить від концентрації біомаси, розміру клітин та їх здатності до агрегації.

Більшість мікроводоростей осідає повільно або залишається у підвішеному стані через свої адаптивні властивості. Навіть важкі діатомові мікроводорості, такі як *Phaeodactylum* або *Navicula*, завдяки складній формі клітин збільшують опір і сповільнюють седиментацію. Цей метод ефективніший для великих або ниткоподібних мікроводоростей, таких як *Arthrospira* або *Spirogyra*, здатних до агрегації⁵⁴. Таким чином, збір біомаси лише седиментацією потребує тривалих періодів утримання. Седиментацію можна покращити шляхом попередньої флокуляції, яка формує флокули, що осідають значно швидше. На промисловому рівні седиментація рідко використовується окремо, а зазвичай є попереднім або допоміжним етапом перед енергоємними методами збору біомаси.



Рис. 2.11 – Природне осідання *Chlorella vulgaris* (Фото авторів АЗ)

Враховуючи переваги та недоліки, найпридатнішими методами збору біомаси мікроводоростей для виробництва біометану є **седиментація, поперечна фільтрація та флотація з розпиленням повітрям**. Вони забезпечують високу ефективність за мінімального споживання енергії, не потребують введення хімікатів і не залишають токсичних залишків, що є критично важливим для процесу анаеробного зброджування.

Таблиця 2.6 – Порівняння різних методів збору біомаси мікробактерій^{52,54,55}

Назва методу	Переваги	Недоліки	Ефективність збору біомаси, %	Вміст сухої речовини після збору, %
Хімічна флокуляція	- Дешева - Швидка - Використовується на промисловому рівні	- Потребує хімічних флокулянтів - Флокулянти можуть бути токсичними та потребують видалення - Можлива контамінація металами	82 – 99	3 – 8
Біофлокуляція	- Дешева - Швидка - Нетоксична - Можливість повторного використання культурального середовища	Можлива контамінація іншими мікроорганізмами	80 – 99	–
Електрофлокуляція	- Підходить для всіх типів - Швидка - Без використання флокулянтів	- Високе споживання електроенергії - Дорогі електроди - Можлива контамінація металами	90 – 98	10
Розчинена повітряна флокація (DAF)	- Швидка - Використовується на промисловому рівні	- Високе споживання електроенергії - Не підходить для всіх типів	понад 90	до 6
Флокація з розпиленням повітрям	- Швидка - Використовується на промисловому рівні - Дешева	Не підходить для всіх видів	80 – 90	до 6
Центрифугування	Швидке	- Дороге - Пошкодження клітин - Складно масштабувати	понад 95	22
Тупикова фільтрація	- Не потребує хімікатів - Проста - Використовується на промисловому рівні - Можливість повторного використання культурального середовища	- Дорогі мембрани - Засмічення мембран - Не підходить для всіх типів	76 – 100	8 – 15
Перехресно-поточна (поперечна) фільтрація	- Не потребує хімікатів - Використовується на промисловому рівні - Можливість повторного використання культурального середовища - Самоочищення	- Дорогі мембрани - Менше засмічення мембран - Не підходить для всіх типів	76 – 100	8 – 15
Седиментація	- Дешева - Проста - Потребує дуже мало електроенергії	- Не підходить для всіх видів - Потребує значного часу	66 – 97	2 – 3

Ринок мікробактерій у світі: потенціал, виробництво, технології

РОЗДІЛ 3

Ринок мікробактерій у ЄС, підтримка розвитку технологій

Згідно з **Algae Industry Report**, у 24 країнах ЄС працює 413 виробників водоростей (як макро-, так і мікробактерій), з яких 153 – виробники макроводоростей у 13 країнах, лідерами є Франція, Іспанія, Ірландія та Норвегія. Більшість із них покладаються на **дикий збір** (68%). Продукція макроводоростей переважно використовується в харчовій промисловості (34%), далі – косметика (18%), нутрицевтики (15%), біостимулятори (11%) та корм для тварин

(10%). Основні ринки продуктів харчування та кормів разом складають приблизно **60% від загального виробництва**⁵².

Харчові продукти та корми також є найбільшими ринками для мікробактерій, при цьому косметика та продукти для благополуччя займають більшу частку, ніж для макроводоростей. Комерційне використання біомаси водоростей, виробленої компаніями Європи, показано на рисунку 3.1.

52 <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c759da5c-aa81-11ef-b5e9-01aa75ed71a1/language-en>

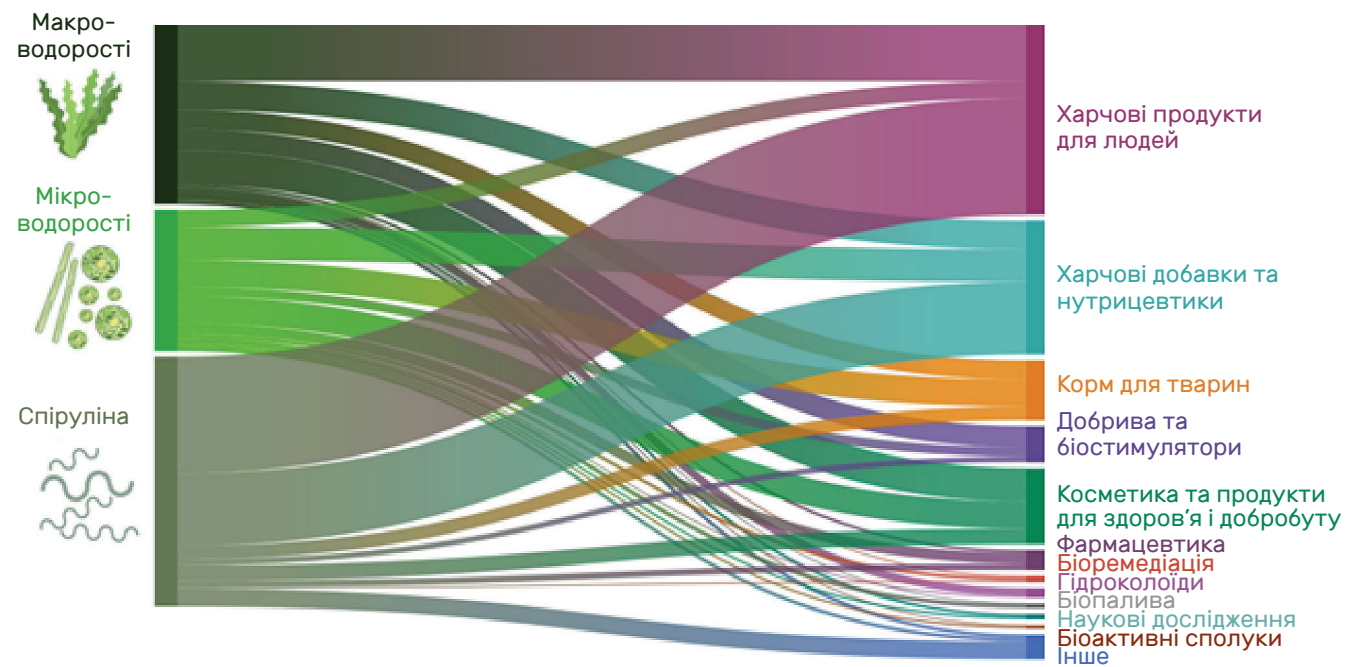


Рис. 3.1 – Використання біомаси водоростей залежно від кількості підприємств з виробництва водоростей у Європі адаптовано⁵³

53 <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6af868a1-4071-11ed-92ed-01aa75ed71a1/language-en>

Більшість компаній мають менше п'яти працівників і займаються як виробництвом, так і переробкою біомаси. Загальна вартість виробництва водоростей у Європі оцінюється у 12,5 млн євро. Загальний обіг у країнах ЄС за період 2016–2020 рр. оцінювався у 161,4 млн євро. Загальні витрати на працю на всіх етапах ланцюга створення вартості складають приблизно 12,9 млн євро. Галузь налічує близько 1 068 працівників, більшість з яких чоловіки (62%) та молодші 41 року (55%)⁵⁹.

Станом на 2022 рік у 17 європейських країнах налічувалося **87 підприємств з виробництва мікробактерій**. Основні сфери застосування мікробактерій у 2022 році включають харчові продукти та добавки (23%), корми (19%), косметику (19%), фармацевтику (8%), добрива та біостимулятори (7%), що разом складає 76% від загального виробництва у ЄС. Нові напрямки включають використання мікробактерій як сировини для виробництва **відновлюваних палив**: біодизель, біоетанол, біогаз, біоводень та інші⁵⁴.

На сьогодні **Німеччина, Іспанія та Італія** є провідними країнами ЄС за кількістю підприємств, які вирощують мікробактерії для різних цілей⁵⁵. Офіційна статистика щодо обсягів виробництва мікробактерій майже відсутня на рівні ЄС; приблизні обсяги становлять 182 т сухої біомаси мікробактерій та 142 т спіруліни. За обсягами виробництва найпоширенішими видами є *Chlorella spp.* та *Haematococcus pluvialis*, які становлять понад 80% загального виробництва¹⁰.

Ринок мікробактерій у Європі динамічно розвивається завдяки екологічним ініціативам, зростанню попиту на натуральні харчові добавки та підтримці біотехнологій. Європейський регіон демонструє швидкий розвиток наукових досліджень і розробок, збільшується кількість публікацій, торгових співпраць та ініціатив сталого розвитку. Згідно з даними Scopus, 33% усіх публікацій із ключовим словом «мікробактерії як їжа» належать європейським дослідникам¹⁵. Ці фактори сприяють зростанню ринку мікробактерій у Європі. Дослідження підтверджують, що ринок мікробактерій у ЄС

стійко зростає і посідає друге місце у світі після Азії (Kurbatova et al., 2024).

Основні види мікробактерій, що використовуються в ЄС: спіруліна, хлорела, *Haematococcus pluvialis* (джерело астаξανтину) та *Nannochloropsis*. Найпопулярніші сектори застосування – це харчові добавки, косметика, фармацевтика, біопластики, очищення води та біопаливо. За даними Європейської асоціації біомаси водоростей (ЕАВА), виробництво мікробактерій у ЄС зростає завдяки спрощенню регулювання та підтримці технологічних інновацій (Vigani, 2020). Найпоширенішими по вирощуванню видом мікробактерій у Європі за кількістю компаній є *Chlorella sp.*, за нею йдуть *Nannochloropsis sp.* та *Haematococcus pluvialis*. Якщо брати до уваги виробництво сухої біомаси, найбільший обсяг має *Chlorella*, далі йдуть *Haematococcus pluvialis* та *Nannochloropsis*. Подібна тенденція спостерігається і на міжнародному рівні, де групи *Chlorella* та *Spirulina* залишаються двома найбільш поширеними (Vigani et al., 2015; Mobin & Alam, 2017).

Європейський Союз активно підтримує розвиток технологій культивування мікробактерій через низку фінансових програм та екологічних ініціатив, зокрема:

- 1. Програми EIC** підтримують інноваційні дослідження у сфері біотехнологій та мікробактерій. Таблиця 3 містить огляд основних програм підтримки досліджень з коротким описом і прикладами проєктів.
- 2. Проєкт ALGA Europe** розробляє стандарти для виробництва та застосування мікробактерій у промисловості.
- 3. Європейський інвестиційний банк (EIB)** надає підтримку розвитку біотехнологічних стартапів.
- 4. Novel Food Regulation** спрощує процедури реєстрації мікробактерій у харчовій промисловості (Cruz & Vasconcelos, 2023).
- 5. Платформи взаємодії**, як **EUA4Algae**, функціонують як простори співпраці для європейських учасників ринку водоростей, включно з фермерами, виробниками, роздрібними продавцями, споживачами, розробниками технологій, інвесторами, урядовими органами, науковцями та неурядовими дослідниками. EU-A4Algae також виконує функцію централізованого інформаційного хабу для оголошень про фінансування, проєктів, бізнес-аналітики та кращих практик.

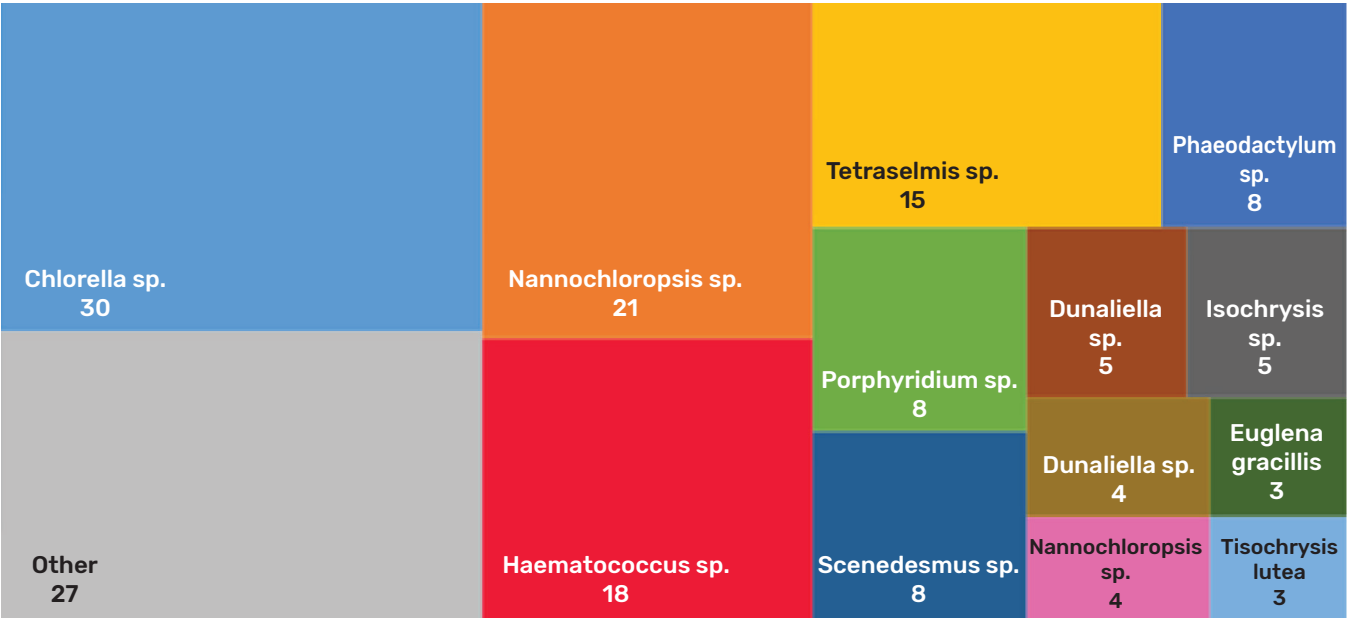


Рис. 3.2 – Розподіл видів мікробактерій за кількістю компаній у ЄС⁵⁶

56 [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/733114/IPOL_STU\(2023\)733114_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/733114/IPOL_STU(2023)733114_EN.pdf)

Таблиця 3. Основні програми підтримки досліджень у сфері мікробактерій із коротким описом та прикладами проєктів

Програма/Ініціатива	Сфера підтримки	Формат фінансування	Формат фінансування
Horizon Europe	Дослідження, інновації, співпраця у біоекономіці, енергетиці, кліматі	Гранти для консорціумів	ABACUS – виробництво біопалива з водоростей; GENIALG – промислове використання макро- та мікробактерій
EIC (European Innovation Council)	Deep tech, стартапи, комерціалізація	Pathfinder (дослідження), Accelerator (впровадження)	AlgaeCytes – біоактивні сполуки з водоростей, підтримка EIC Accelerator
EIT (Food, InnoEnergy, Climate-KIC)	Інновації, навчання, стартапи у агро-, енергетиці, кліматі	Гранти, акселерація, навчання	Algae for Food & Feed – проєкти через EIT Food; програми біо-інновацій
Interreg Europe/Interreg Danube	Регіональні інновації, сталий розвиток, транскордонна співпраця	Гранти для партнерів із кількох країн	DanuBioValNet – біоекономічні ланцюги вартості в регіоні Дунаю, включно з водоростями
LIFE Programme	Екологія, клімат, енергоефективність	Гранти на пілотні технології	LIFE ALGAECAN – водорості для очищення стічних вод та виробництва біомаси
COST Action	Мережі дослідників, обмін знаннями	Фінансування конференцій, семінарів, мобільності	COST Action ALGAE – міждисциплінарна мережа для обміну даними про водорості
BIOEAST Initiative	Агробіоекономіка у Центральній та Східній Європі	Політична платформа, дорожні карти R&I	Містить мікробактерії як частину політичних стратегій

54 Vazquez Calderon, F., Sanchez Lopez, J., An overview of the algae industry in Europe. Producers, production systems, species, biomass uses, other steps in the value chain and socio-economic data, Guillen, J., Avraamides, M. editors, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. doi:10.2760/813113, JRC130107.

55 <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.626389/full>

Ринок мікроводоростей у Європі має значний потенціал завдяки підтримці біотехнологій, екологічним ініціативам та активним інвестиціям. Подальший розвиток залежить від спрощення регуляторних процедур, розширення ринкових можливостей та вдосконалення технологій вирощування.

Ринок мікроводоростей у світі

Світовий ринок мікроводоростей зростає завдяки підвищеному попиту на натуральну та сталу продукцію у харчовій, фармацевтичній та біоенергетичній сферах.

Розмір ринку: оцінка на 2024 рік – **782,59 млн USD**, прогноз на 2032 рік – **1,38 млрд USD**, CAGR 7,29% ⁶³.

Альтернативна оцінка: ринок продуктів на основі мікроводоростей у 2023 році оцінювався **13,25 млрд USD**, очікується ріст до **23,01 млрд USD** до 2030 року (CAGR 8,2%)⁶⁴.

Лідери ринку:

Північна Америка – 37,2% частка світового ринку у 2024 році, завдяки високому попиту на натуральні харчові барвники, нутрицевтики та інвестиціям у технології ⁶⁵.

Хоча існують відмінності в оцінках розміру ринку через різницю в методології та охопленні, джерела (63, 66 та інші) підтверджують стійке та тривале зростання. Це підкреслює вирішальну роль мікроводоростей як стратегічного ресурсу для сталого розвитку та енергетичної незалежності.

Ключові чинники зростання включають попит на природні біоактивні сполуки для фармацевтики, косметики та харчової промисловості, екологічні тренди та інвестиції в біотехнології. Виробництво астаксантину (*Haematococcus pluvialis*) для дієтичних добавок і косметики займає ключову ринкову позицію. Потенціал розвитку біопластиків з мікроводоростей також стимулює зростання ринку. Очікується, що зростаючі інвестиції в біотехнологію водоростей прискорять впровадження нових рішень (Apraku et al., 2025) ⁵⁷.

Виклики, що стримують використання мономерів з мікроводоростей, включають

економічну доцільність виробництва високоякісної біомаси мікроводоростей із бажаними метаболітами, ефективні методи зневоднення і культивування, а також ефективні методи екстракції та переробки. Світова частка ринку розподілена між різними видами мікроводоростей, такими як *Spirulina*, *Chlorella*, *Nannochloropsis*, *Haematococcus*, *Isochrysis*, *Chlamydomonas* та інші. Ці мікроводорості мають різноманітні сфери застосування в промисловості, особливо в харчовій і кормовій. В останні роки світовий ринок засвідчив значне зростання завдяки посиленням зусиллям у сфері НДДКР та промисловим застосуванням, особливо у харчовій та кормовій промисловості. Їхній високий вміст поживних речовин, таких як білки та вітаміни, викликав зростаючий інтерес з боку виробників харчових і кормових продуктів.

Швидке зростання чисельності світового населення стимулює попит на харчові продукти, тоді як зміна споживчих тенденцій додатково підвищує попит на білок як у харчовій, так і у кормовій продукції. Зростання чисельності великої рогатої худоби та птиці також сприяє зростанню світового ринку.

Північна Америка демонструє сильну орієнтацію на рослинні продукти харчування, технологічні інновації та сталий розвиток, що робить її одним із найпомітніших регіонів світу. Такі країни, як США, Канада та Мексика, демонструють значний попит на функціональні продукти харчування та відзначаються суттєвим розвитком у птахівництві та тваринництві. Наприклад, у квітні 2024 року Міністерство енергетики США (DOE) оголосило про нову можливість фінансування у розмірі 18,8 млн доларів США для НДДКР, пов'язаних з мікроводоростями.

Регіон Азія–Тихоокеан, включаючи такі країни, як Індія, Китай та Японія, пропонує значний потенціал зростання завдяки потужній галузі тваринництва та зростаючому попиту на інноваційні кормові продукти. Крім того, зростаючий попит на добавки на основі мікроводоростей додатково підтримує розширення ринку. Згідно з даними уряду Індії, країна становить близько 20% світового поголів'я великої рогатої худоби.

Південна Америка демонструє значний потенціал зростання протягом прогнозованого періоду, зумовлений сприятливими екологічними умовами, державною підтримкою

та швидким розвитком біотехнологічного сектору.

Близький Схід і Африка пропонують різні можливості для розширення ринку, підтримувані державними ініціативами та зростаючою обізнаністю про продукти на основі мікроводоростей, такі як олії, порошки та інші. Регіон має нереалізований потенціал для досліджень, виробництва та комерціалізації мікроводоростей.

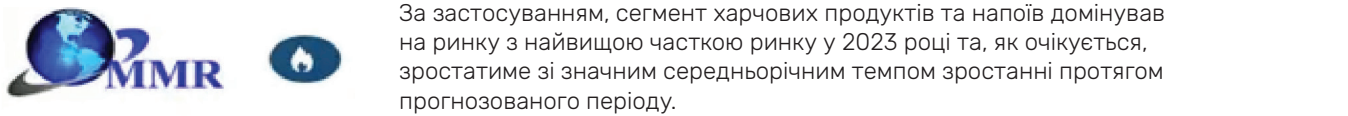
Глобальний ринок мікроводоростей можна аналізувати з двох перспектив: за видами (типами) та за кінцевим застосуванням. У наступних підрозділах розглянуто обидва виміри.

Глобальний ринок мікроводоростей за видами

Глобальний ринок мікроводоростей сегментується за видами на *Spirulina*, *Chlorella*,

Nannochloropsis, *Haematococcus*, *Isochrysis*, *Chlamydomonas* та інші (рис. 3.4).

Сегмент *Spirulina* домінує на глобальному ринку завдяки високій доступності та широкому виробництву. *Spirulina* є концентрованим джерелом жирних кислот, амінокислот і вітамінів, що робить її ідеальною для багатьох видів риб і креветок, які займають найбільшу частку в аквакультурі. *Nannochloropsis* – одноклітинні сферичні або овальні водорості (діаметром 2–5 мікрон), багаті на фотосинтетичні пігменти, білки та поліненасичені жирні кислоти (включаючи омега-3). Її швидке зростання за звичайних умов культивування робить її популярною для кормів в аквакультурі та дієтичних добавок. Очікується, що цей сегмент продемонструє суттєве зростання протягом прогнозного періоду.



Ринок продуктів на основі мікроводоростей



Середня ціна продажу видалення вуглекислого газу (CDR) у світі у 2023 році



Рис. 3.3 – Частка ринку мікроводоростей у 2023 році та прогноз адаптовано з ⁵⁸

57 L. M. Casanova, A. Macrae, J. E. de Souza, A. Neves Junior, and A. B. Vermelho, "The Potential of Allelochemicals from Microalgae for Biopesticides," Plants, vol. 12, p. 1896, 2023. doi: 10.3390/plants12091896.

58 <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-microalgae-based-products-market/63970/>

Глобальний ринок мікроводоростей за застосуванням

Глобальний ринок сегментується на харчові продукти та кормові застосування. Сегмент харчових продуктів займає значну частку ринку і, за прогнозами, продемонструє найвищий CAGR протягом прогнозного періоду. Цей сегмент зазнав значного розвитку завдяки зростанню кількості глобальних публікацій та досліджень. Продукція стала поширеною в харчовій сфері через високу поживну цінність та широке застосування *Spirulina* та *Chlorella*. *Chlorella* є одними з найбільш розповсюдженою серед видів мікроводоростей у складі дієтичних добавок, функціональних харчових інгредієнтів і натуральних харчових барвників. Крім того, застосування в харчовій промисловості включає продукти, такі як хлібобулочні вироби, локшина, рослинні продукти та інші, що сприяє зростанню харчового сегмента у світі (рис. 3.1).

Основні чинники зростання глобального ринку мікроводоростей

Зростання попиту на натуральні та сталі інгредієнти. Підвищений інтерес до натуральних, веганських та органічних продуктів у харчовій, косметичній та фармацевтичній галузях. Водорості — швидко відновлюваний ресурс із мінімальним вуглецевим слідом.

Розширення у сфері нутрицевтиків. Зростаючий попит на суперфуди (*Spirulina*, *Chlorella*), омега-3 та антиоксиданти (астаксантин) з водоростей для здоров'я серцево-судинної системи, імунітету та зору. Зростання превентивної медицини та сектору функціональних продуктів.

Використання в аквакультурі та сільському господарстві. Мікроводорості застосовуються як екологічно чисті корми для риб, креветок та домашніх тварин, а також як біостимулятори й добрива, що стимулює інтерес до біоагротехнологій.

Активне використання в косметиці. Активні інгредієнти для анти-ейдж, захисту SPF та детоксикації. Косметика на основі водоростей відповідає тренду «зеленої краси». Наприклад, попит на астаксантин (*Haematococcus pluvialis*) для здоров'я очей та шкіри різко зріс у США та Китаї (Xue et al., 2023).

Зростаючий попит на альтернативні джерела білка. Водорості мають високу щільність білка (до 60%) і є сталою альтернативою тваринному білку.

Кліматична стійкість та циркулярна економіка. Здатність мікроводоростей поглинати CO₂ та очищати стічні води – їх використання розширюється в Китаї та Індії для очищення промислових стічних вод (Heide et al., 2024).

Державна підтримка та підтримка інвесторів ESG. США та Японія активно розробляють біополімери на основі водоростей для екологічної упаковки (Marasca et al., 2024). У Північній Америці спостерігається високий попит на функціональні продукти та біопластики (Santos et al., 2024).

Технологічний прогрес та інвестиції. Нові методи культивування (фотобіореактори, біорефінарії), автоматизація та біоінженерія. Зростає інтерес венчурного капіталу та підтримка міжнародних програм (EU4Algae, Horizon Europe тощо).

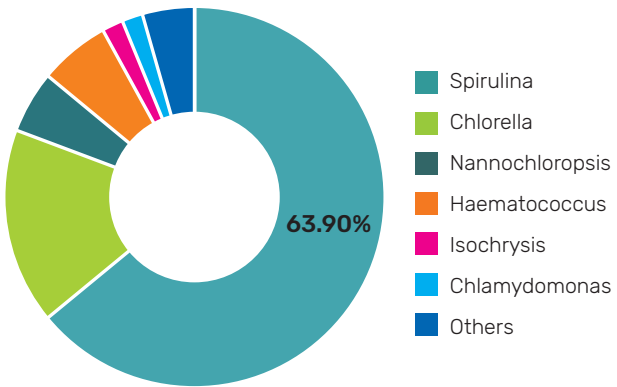


Рис. 3.4 – Глобальний ринок мікроводоростей за видами у 2024 році ⁵⁹

Основні виклики:

Висока вартість культивування – енергоємні фотобіореактори залишаються ключовим ринковим обмеженням (Thevarajah et al., 2024).

Регулювання та стандартизація – необхідна гармонізація стандартів для застосування у харчовій і фармацевтичній сферах (Al-Hammadi et al., 2024).

З 2016 року спостерігається стрімке зростання кількості стартапів у сфері вирощування водоростей, як показано на рис. 3.5, що свідчить

⁵⁹ <https://www.fortunebusinessinsights.com/microalgae-market-110314>

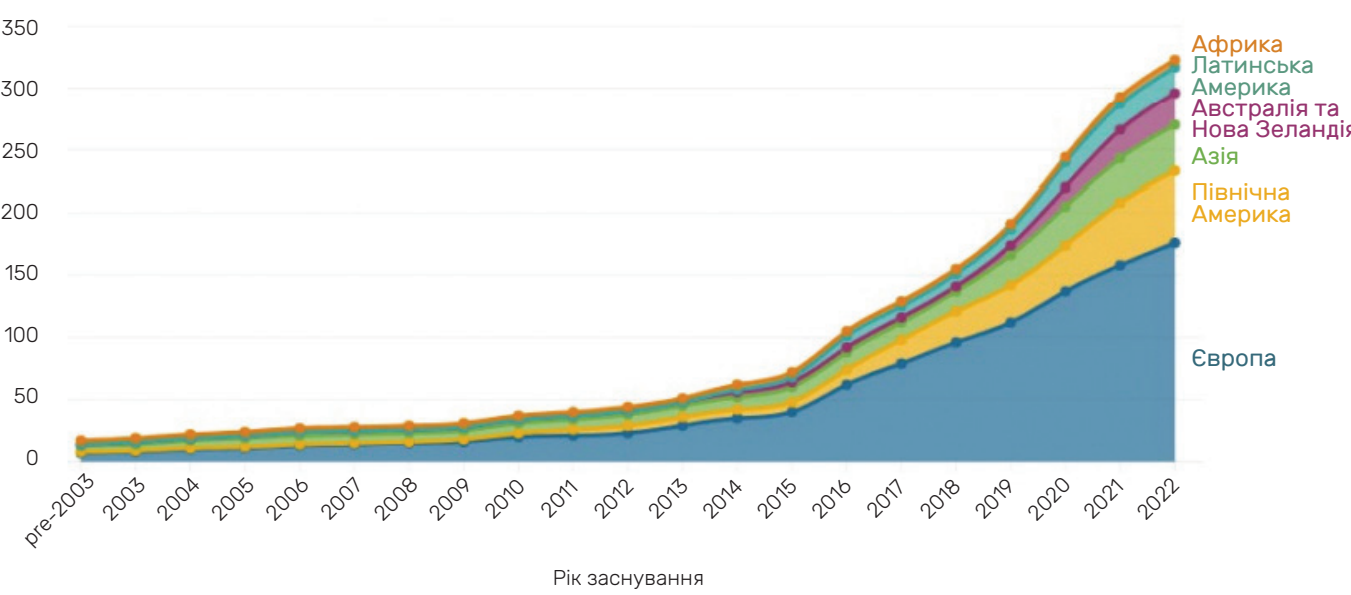


Рис. 3.5 – Глобальний розвиток стартапів з вирощування водоростей за роками заснування, 2003–2022 ⁶³

про високий інвестиційний інтерес до цієї тематики у світі.

Глобальний ринок мікроводоростей поза межами ЄС демонструє високий потенціал зростання, зумовлений інноваціями в біотехнологіях, розвитком біопалива та харчової промисловості. Основними лідерами залишаються Азія, Північна Америка та Латинська Америка. Зростаючий попит на натуральні харчові барвники, підвищення популярності нутрицевтиків і дієтичних добавок, а також технологічні інвестиції, очікувано, стануть ключовими чинниками регіонального розвитку. Варто зазначити, що ці чинники не пов'язані з виробництвом біометану; скоріше, біометан може з'явитися як паралельний, додатковий напрям у майбутньому, але наразі він не впливає на розширення ринку.

Вихід біометану/біогазу з різних видів мікроводоростей

Культивування мікроводоростей забезпечує синтез широкого спектра цінних хімічних сполук: білків, ліпідів, вуглеводів, вітамінів, антиоксидантів, ферментів, пігментів тощо. Домінуюча сполука в хімічному складі біомаси водоростей безпосередньо залежить від конкретного виду мікроводоростей та умов культивування. Різні види мікроводоростей демонструють різну здатність виживати та розмножуватися за наявності певних речовин,

таких як аміак, важкі метали тощо. Тому вибір відповідного штаму мікроводоростей є одним із ключових факторів при розробці технологій культивування мікроводоростей на рідкій фракції дигестату (РФД). Для виробництва біогазу з біомаси мікроводоростей критично важливим є досягнення максимальної продуктивності біомаси та здатність анаеробних бактерій розкласти біомасу, вирощену на дигестаті біогазових установок. Продуктивність біомаси та її біодеградабельність визначатимуть вихід біометану і, відповідно, економічну доцільність технології.

Оптимальний штам мікроводоростей для максимального виробництва біогазу повинен мати ⁶⁰:

- тонку або відсутню клітинну стінку;
- великі розміри клітин;
- високу питому швидкість росту у нестерильних умовах;
- високу стійкість до природних контамінантів;
- клітинну стінку на основі вуглеводів.

Хоча вихід метану залежить від складу мікроводоростей, стійкість клітинної стінки вважається обмежувальним фактором для анаеробного зброджування мікроводоростей.

⁶⁰ Álvaro Torres, Fernando G. Fermo, Bárbara Rincón, Jan Bartacek, Rafael Borja, David Jeison. Challenges for Cost-Effective Microalgae Anaerobic Digestion, Biodegradation, Engineering and Technology. (2013). URL: <https://www.intechopen.com/chapters/45072>

Кінетика анаеробного зброджування значною мірою залежить від здатності до розкладання конкретного штаму мікродоростей. Низькі виходи метану, зафіксовані в окремих дослідженнях, пов'язували з низьким рівнем руйнування клітин та великою кількістю залишкових речовин, які важко розкласти під час анаеробного зброджування. Згідно з цими даними, легкодеградабельні штами мікродоростей або не мають клітинної стінки, або мають білкові клітинні стінки без вмісту целюлози/геміцелюлози ⁶⁸.

Теоретичний біометановий потенціал оцінюється на рівні 470–800 м³ CH₄/т СОР. Експериментальні дослідження показали, що продуктивність біометану може сягати 337, 450 або 587 м³ CH₄/т СОР. Специфічні виходи біогазу з різних видів мікродоростей та їх хімічний склад наведені в таблицях 3.2 та 3.3. У деяких джерелах, ^{61 62 63} вихід метану з мікродоростей пов'язували з хімічним складом біомаси; однак з часом ця гіпотеза виявилася неточною. Експериментальні дані з літератури не показують сильної кореляції між вмістом ліпідів, вуглеводів і білків у різних видах водоростей та виходом метану, отриманим різними авторами. Тому простий хімічний склад біомаси водоростей не може вважатися основним чи єдиним фактором при виборі найкращого штаму для виробництва біометану ²¹. Вирішальними чинниками, що впливають на вихід метану, є насамперед склад клітинної стінки та продуктивність біомаси. Більшість хлорофітових (зелених мікродоростей) мають складні та жорсткі клітинні стінки, що містять компоненти, вбудовані в матрицю уронових кислот разом з іншими нейтральними цукрами. Приблизно 40% компонентів мікродоростей є легкодоступними для виробництва біометану, тоді як решта 60% вимагають попередньої обробки для доступу до внутрішньоклітинного вмісту⁶⁴.

61 Sialve B., Bernet N. and Bernard O. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. Biotechnology Advances 2009. Vol.27(4), 409–16. ISSN: 0734–9750

62 Marcia Morales, León Sánchez, Sergio Revah. The impact of environmental factors on carbon dioxide fixation by microalgae. FEMS Microbiology Letters, Volume 365, Issue 3, 2018 <https://academic.oup.com/femsl/article/365/3/fnx262/4705896?searchresult=1>

63 Amos Richmond. Handbook of Microalgae Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Science Ltd.URL: <https://alगतex.org/ebook/Handbook%20of%20microalgal.pdf>

64 Raul Muñoz & Cristina Gonzalez-Fernandez.Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts (Enhanced Edition) From Feedstock Cultivation to End-Products. United Kingdom:Elsevier Science. 2017.P. 540

Також у⁷³ виділяють чотири типи клітинних стінок залежно від їхньої структури та складності. Підвищена стійкість клітинних стінок мікродоростей до руйнування пов'язана з наявністю біополімерів, подібних до спорополеніну. Іншою недеградабельною сполукою, виявленою в клітинній стінці мікродоростей, є алгенан — негідролізований, високостійкий біополімер, що складається з довголанцюгових n-алкільних одиниць, з'єднаних естерними зв'язками. Наявність алгаенану у видів, таких як *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Haematococcus* та *Nannochloropsis*, ускладнює виробництво біогазу, оскільки потрібна попередня обробка для руйнування їхніх клітинних стінок, що підвищує експлуатаційні витрати²⁶.

У результаті огляду літератури для аналізу та відбору оптимальних видів було визначено шість видів мікродоростей, які найчастіше використовуються для очищення стічних вод та виробництва біопалива: *Euglena gracilis*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella sp.*, *Scenedesmus*, *Chlamydomonas reinhardtii* та *Spirulina platensis*, як показано на рис. 3.6.

Chlorella vulgaris була першою мікродорістю, яку почали інтенсивно культивувати у промислових масштабах. Однак вона виявилася неоптимальною для виробництва біогазу через дуже міцну і хімічно стійку клітинну стінку, що містить шар спорополеніну. *Scenedesmus* виявив кращу придатність, але обидва види потребують попередньої обробки перед анаеробним зброджуванням через структуру клітинної стінки⁶⁶.

Варто зазначити, що попри складну клітинну стінку, *Chlorella* демонструє найвищу швидкість росту і є єдиним видом, здатним витримувати дуже високі концентрації CO₂ у газах (40–100%)²⁴, що може бути корисним для подачі концентрованого CO₂ як джерела вуглецю після збагачення біогазу до біометану. *Dunaliella* має просту клітинну стінку, що робить її оптимальною з точки зору біорозкладності для виробництва біогазу, однак вона потребує солоних умов для оптимального росту, що вимагає додавання солей. *Chlamydomonas reinhardtii* широко обирають для експериментів із

66 Kostikov I.Yu., Tsarenko P.M. Algology. manuscript of a textbook for students of the 3rd–4th year of the "Botany" specialty. – Kyiv, 2009–2013. – 377 p. <https://docplayer.net/71246758-Kostikov-i-yu-tsarenko-p-m-algologiya-rukopis-pidruchnika-dlya-studentiv-3-4-kursu-specialnosti-botanika.html>

Таблиця 3.2. Хімічний склад різних видів мікродоростей , % ⁶⁵

Вид	Білки	Вуглеводи	Ліпіди	Нуклеїнові кислоти
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50 – 56	10 – 17	12 – 14	3 – 6
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	-	1.9	-
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8 – 18	21 – 52	16 – 40	-
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21	-
<i>Chlorella vulgaris</i>	51 – 58	12 – 17	14 – 22	4 – 5
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2	-
<i>Spirogyra sp.</i>	6 – 20	33 – 64	11 – 21	-
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8	-
<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	1 – 2
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3	-
<i>Porphyridium cruentum</i>	28 – 39	40 – 57	9 – 14	-
<i>Spirulina platensis</i>	46 – 63	8 – 14	4 – 9	2 – 5
<i>Spirulina maxima</i>	60 – 71	13 – 16	6 – 7	3 – 4.5
<i>Synechococcus</i>	63	15	11	5
<i>Anabaena cylindrica</i>	43 – 56	25 – 30	4 – 7	-

65 Jerry D Murphy, Bernhard Drosg, Foin Allen, Jacqueline Jerney, Ao Xia, Christiane Herrmann. A perspective on algal biogas. IEA Bioenergy.2015. URL: https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/AD_of_Algae_ebook_end.pdf

Таблиця 3.3 Питомий вихід різних видів мікродоростей, отриманий в результаті батч тестів⁷⁴

Вид	Темп. [°C]	Виробництво біогазу [л/кг СОР]	Виробництво CH₄ [л/кг СОР]	CH₄ вміст [%]
<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>Nannochloropsis 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</i> та <i>Scenedesmus</i>)	35 – 50		170 – 320	62 – 64

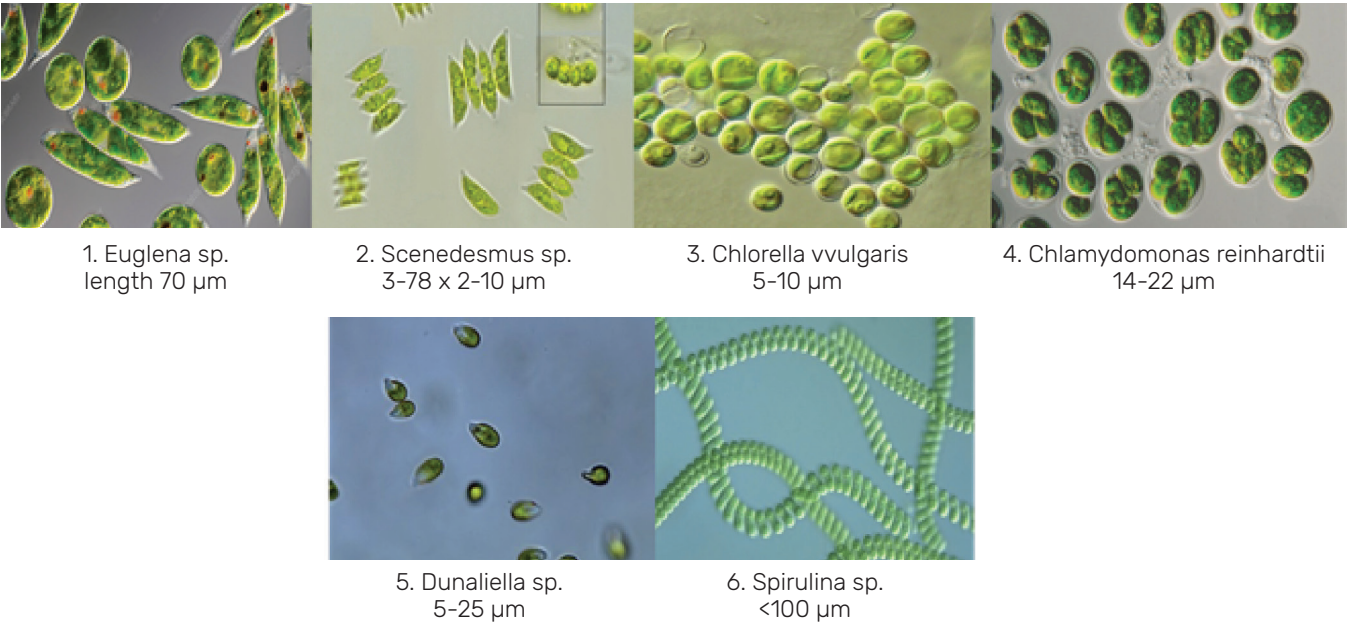


Рис. 3.6 – Мікроскопічний вигляд деяких видів мікроводоростей

біопаливом завдяки перевагам, таким як висока питома швидкість росту, висока адаптивність та легкість у культивуванні.

Euglena gracilis характеризується високою толерантністю до підвищених концентрацій азоту і фосфору. Згідно з експериментальними дослідженнями, вона продемонструвала здатність ефективно видаляти сполуки азоту та фосфору з побутових стічних вод⁶⁷.

Отже, з точки зору біорозкладності, *Euglena gracilis* та *Chlamydomonas reinhardtii* виглядають найбільш оптимальними видами, оскільки вони мають простішу структуру клітинної стінки, не містять нерозкладних полімерів, можуть витримувати високі концентрації амонійного азоту (важливо при використанні дигестату) та демонструють високі питомі виходи метану.

Передові біопалива з мікроводоростей

Передові біопалива з мікроводоростей можуть включати як рідкі палива (такі як біодизель,

біоетанол, авіабіопаливо), так і газоподібні (такі як біометан або біоводень). Відповідно до RED II, біометан, вироблений з мікроводоростей, кваліфікується як передове біопаливо, якщо він використовується в транспортному секторі, тоді як рідкі палива на основі мікроводоростей наразі розробляються переважно на пілотних і демонстраційних рівнях.

Виробництво біопалив із мікроводоростей є одним із ключових напрямів у глобальних стратегіях енергетичного переходу, спрямованих на зменшення викидів парникових газів, зниження конкуренції з харчовим виробництвом, захист довкілля та боротьбу зі зміною клімату, частково завдяки їх здатності використовувати CO₂ з промислових або біогенних джерел як субстрат для росту. Багато країн проводять масштабні дослідження в галузі мікроводоростевої біоенергетики, супроводжувані значними фінансовими та людськими інвестиціями. Проте комерціалізація цього сектору все ще стикається зі значними економічними викликами, зокрема через високі витрати на виробництво.

Мікроводорості здійснюють фотосинтез, демонструючи високі темпи росту та продуктивності. Зазвичай біомаса мікроводоростей містить приблизно 45–50% вуглецю (C), 7,6% азоту (N) та 1,4% фосфору (P).

Виробництво біопалив із мікроводоростей має низку переваг:

- відсутність конкуренції з харчовими ланцюгами людини чи тварин;
- високий вміст вуглеводів, білків та олій;
- довгостроковий спосіб утворення O₂ і його використання у фотосинтетичному диханні для зниження викидів CO₂;
- мікроводорості містять більший вміст ліпідів (у перерахунку на суху речовину) порівняно з олійними культурами, такими як соя;
- крім того, цикл росту мікроводоростей становить близько 15 днів, тоді як соя має один або два врожаї на рік;
- при вирощуванні на суші у відкритих ставках або у фотобіореакторах мікроводорості кваліфікуються як сировина відповідно до Директиви RED II, Додаток 9, і підлягають подвійному зарахуванню – виробництво біопалив третього покоління;

- вища фотосинтетична ефективність мікроводоростей (максимум ~10%) порівняно із наземними рослинами (~5% максимум);
- вища продуктивність біомаси (50–70 т/га/рік) порівняно з наземними рослинами (10–20 т/га/рік);
- здатність рости на непридатних для сільського господарства землях і в морських умовах;
- можливість культивування у закритих системах із використанням стічних або солоних вод, що суттєво знижує споживання прісної води.

На рис. 3.7 подано огляд біопалив і продуктів, які можна отримати з біомаси мікроводоростей залежно від методів переробки та цільових компонентів біомаси.

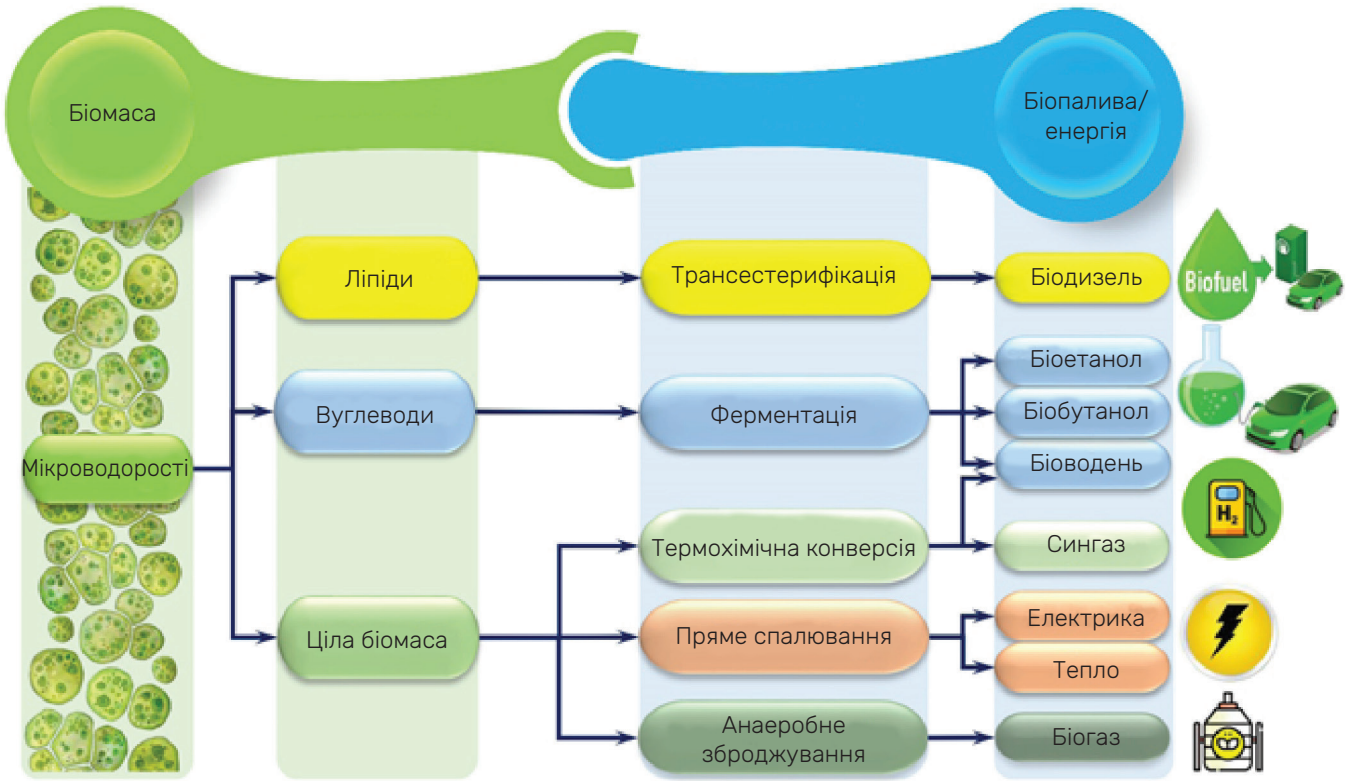


Рис. 3.7 – Продукти і біопалива, які можна отримати з біомаси мікроводоростей⁶⁸

67 I. Nezhytska, S. Shamanskyi, L. Pavliukh, S. Boichenko, Z. Gorbunova, O. Horbachova, V. Repeta. Removal of Biogenic Compounds from Sewage Water in a Culture of *Euglena Gracilis* (EUGLENOPHYTA). Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control, vol 510. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_9

68 Tiwari B., Upadhyay N. та ін. Microalgae: A potential source for sustainable development // BioEnergy Research. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 2035–2056. – DOI: 10.1007/s11101-022-09819-y

Останнім часом найбільш вивченими та розвиненими технологіями є виробництво біодизелю, біоетанолу та біометану з біомаси мікроводоростей завдяки високим концентраціям ліпідів і вуглеводів.

Ліпіди є одним із ключових компонентів мікроводоростей, становлячи 2–60% сухої маси клітин залежно від виду та умов культивування (Wijffels, 2006). Вони виконують функції мембранних компонентів, запасних речовин і енергетичних резервів. Ліпіди можуть використовуватися безпосередньо як рослинна олія (SVO) або перетворюватися на біодизель шляхом трансестерифікації тригліцеридів та вільних жирних кислот. Через вищий рівень ненасиченості олії водоростей менш придатні для прямого використання у певних типах двигунів. Енергоспоживання на сушіння становить приблизно 85% від загальних енерговитрат у процесі виробництва біодизелю з мікроводоростей⁶⁹.

Ефективне виробництво біодизелю потребує штамів із високим вмістом олії та швидким ростом. Закриті фотобіореактори забезпечують стабільні умови і запобігають контамінації. Ліпіди зазвичай накопичуються за умов стресу, таких як нестача поживних речовин. Це створює компроміс між продуктивністю біомаси та вмістом ліпідів, хоча Rodolfi et al. (2009) продемонстрували можливість досягнення високого рівня ліпідів при збереженні росту культури.

Окрім ліпідів, перспективними є також вуглеводи. Біоетанол можна отримати з вуглеводів водоростей після гідролізу крохмалю або полісахаридів клітинної стінки (Hamelinck et al., 2005). Ключовою перевагою водоростей є відсутність лігніну та їх відносно однорідний склад. Генетично модифіковані штами зелених водоростей можуть безпосередньо виробляти етанол із CO₂ і світла (Deng and Coleman, 1999), хоча ця технологія перебуває на ранній стадії розвитку.

Botryococcus braunii продукує до 60% (а в деяких випадках понад 80%) вуглеводнів у сухій біомасі, які можуть бути перетворені на рідкі палива (Hillen et al., 1982; Wijffels, 2006). Ці сполуки накопичуються на поверхні клітин, що полегшує їх екстракцію. Проте цей вид росте повільно

(час подвоєння до 72 годин), тому економічно ефективне культивування можливе лише у відкритих системах із низькою вартістю, зокрема з використанням солонуватої води (Qin, 2005).

Виробництво водню з водоростей ґрунтується на фотобіологічних процесах за відсутності кисню (Melis and Harpe, 2001). Поточні технології демонструють низьку продуктивність – до 20 г H₂/м²/день – і потребують оптимізації біологічного шляху шляхом генної інженерії (Kardan and Kargi, 2006).

Анаеробне зброджування є одним із найперспективніших шляхів переробки морських макроводоростей та мікроводоростей, особливо після вилучення цінних сполук (Reith et al., 2005). Хоча виробництво водню та етанолу залишається на стадії досліджень, виробництво біодизелю є найбільш розвиненою сферою. Для виробництва біодизелю підходять як відкриті, так і закриті системи культивування, а трансестерифікація ліпідів у біодизель є вже добре відпрацьованою технологією (Chisti, 2008a; Rodolfi et al., 2009). Виробництво біометану з мікроводоростей не потребує попереднього вилучення окремих компонентів, оскільки вся органічна фракція біомаси водоростей (білки, вуглеводи та ліпіди) перетворюється на метан і діоксид вуглецю шляхом анаеробного зброджування⁷⁰.

Виробництво біопалива з мікроводоростей передбачає кілька етапів: культивування, збирання біомаси, екстракцію ліпідів та трансестерифікацію у біодизель. Поточні дослідження зосереджені на оптимізації цих процесів, включаючи:

- використання гібридних методів фотота гетеротрофного культивування для підвищення продуктивності біомаси (Raja et al., 2024);
- інтеграцію систем збирання та переробки зі спорудами очищення стічних вод;
- розробку методів ферментативної трансестерифікації як екологічно чистої альтернативи хімічній обробці.

Інтеграція процесів також демонструє перспективність у підвищенні ефективності – наприклад, одночасне виробництво біогазу або біоводню з залишкової біомаси після екстракції ліпідів.

Економічні та екологічні виклики

Незважаючи на значний потенціал мікроводоростей, їхнє комерційне виробництво все ще стикається з кількома бар'єрами:

- високі витрати на обладнання для культивування та збирання (фотобіореактори, сепаратори);
- великі об'єми води, які потрібно циркулювати та обробляти під час культивування, що збільшує енергоспоживання та експлуатаційні витрати, навіть якщо можна використовувати неперісні джерела води;
- труднощі масштабування процесів при збереженні ефективності (Raja et al., 2024).

Проте дослідження показують, що інтеграція технологій (наприклад, використання залишкових потоків з інших галузей чи енергетична синергія із сонячними електростанціями) може суттєво знизити витрати та підвищити загальну ефективність виробництва (Raja et al., 2024).

Мікроводорості становлять міцну основу для розвитку біопалив третього покоління. Їхній швидкий ріст, високе накопичення ліпідів і здатність рости на непридатних для сільського господарства землях без конкуренції з продовольчими культурами забезпечують суттєві переваги. Хоча повна економічна доцільність поки що не досягнута, технологічні інновації та екологічні переваги вказують на великі перспективи цього напрямку.

Дигестат як субстрат для культивування мікроводоростей

Характеристика дигестату

Використання дигестату для вирощування біомаси мікроводоростей є критичним фактором у зниженні вартості виробництва вдосконаленого біометану. Дигестат, що утворюється як побічний продукт анаеробного зброджування (AD), є складною багатокомпонентною рідиною, яка може слугувати ефективним джерелом макро- та мікроелементів для культивування мікроводоростей. Його склад суттєво варіює залежно від:

- типу субстрату (наприклад, гній ВРХ, послід птиці, силос кукурудзи, органічні відходи харчової промисловості);
- стадії ферментації (сирий чи стабілізований дигестат);
- сезону – сезонні коливання впливають на концентрації поживних речовин через зміни у складі сировини.

РОЗДІЛ 4

Зокрема, дигестат із високим вмістом амонійного азоту (NH₄) та органічного вуглецю вважається перспективним середовищем для вирощування азотфіксуючих та стресостійких мікроводоростей, таких як *Chlorella* чи *Scenedesmus*.

Біогазові установки зазвичай працюють цілорічно, що потребує зберігання дигестату між весняним і осіннім внесенням у ґрунт. Під час тривалого зберігання у відкритих резервуарах або лагунах викиди метану в атмосферу зростають пропорційно (до 5–10% від метанового потенціалу сировини). На більшості діючих біогазових установок, зокрема в Україні, обробка сирого дигестату обмежується розділенням на тверду та рідку фракції. Подальша обробка потребує додаткових витрат і повинна бути економічно обґрунтована.

69 Lardon L., Hélias A., Sialve B., Steyer J. P. and Bernard O. Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. Environmental Science and Technology.2009. 43(17). 6475–81.2009. ISSN: 1520-5851

70 <https://www.intechopen.com/chapters/45072>.

З практичної точки зору, найбільш економічно доцільними є розбавлення та мікрофільтрація, оскільки вони забезпечують оптимальну якість середовища при низькій вартості. Звичайні експлуатаційні витрати для простого розбавлення становлять <1 €/м³, тоді як для мікрофільтрації під тиском – 1–3 €/м³ залежно

від типу мембрани та енерговитрат (Oliveira et al., 2020; Raja et al., 2024). Для порівняння, більш складні методи, такі як ультрафільтрація, нанофільтрація чи зворотний осмос, можуть перевищувати 5–10 €/м³, що робить їх менш привабливими для пілотних та промислових систем культивування мікроводоростей.

Виробництво біогазу/біометану з мікроводоростей

Вибір видів мікроводоростей та системи культивування

Ефективність виробництва біометану з мікроводоростей значною мірою залежить від виду, який використовується як сировина. Деякі види ростуть швидко, проте мають низьку придатність до анаеробного зброджування. Інші, навпаки, мають високу біодоступність, але низьку продуктивність. Вибір виду завжди є компромісом, тому до цього питання потрібно підходити обережно для знаходження оптимального рішення.

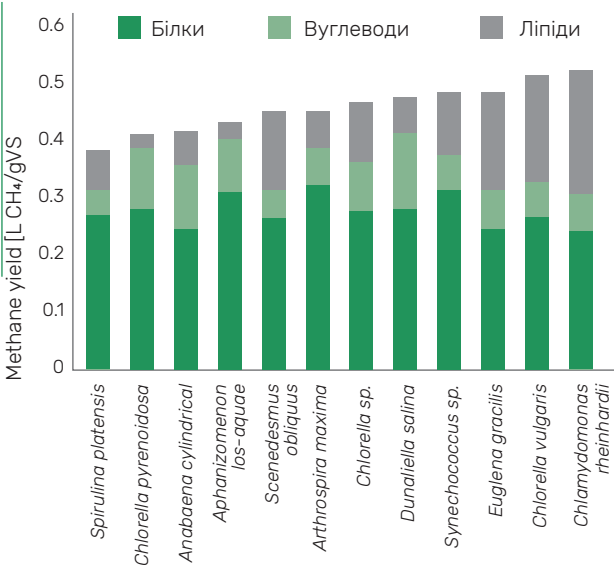


Рис. 5.1 – Питомий вихід метану з білків, вуглеводів і ліпідів, присутніх у різних видах мікроводоростей ⁸¹

РОЗДІЛ 5

Теоретичний вихід метану з білків, вуглеводів і ліпідів становить 0,50, 0,42 та 1,01 л СН₄/г СОР відповідно. Навіть якщо ці значення використовувати для оцінки потенційного виходу метану з різних видів мікроводоростей, вони не дають однозначних результатів. Хоча теоретично вихід метану залежить від складу мікроводоростей, стійкість клітинної стінки вважається обмежувальним фактором для анаеробного зброджування. Кінетика анаеробного зброджування значною мірою залежить від здатності конкретного виду мікроводоростей до розкладу. Тому при виборі виду мікроводоростей необхідно орієнтуватися й на інші показники.

Ідеальний вид мікроводоростей для максимального виробництва біометану має такі характеристики:⁷²

- тонка або відсутня клітинна стінка;
- великі клітини;
- висока швидкість росту в нестерильному середовищі;
- висока стійкість до природних забруднювачів;
- клітинна стінка на основі вуглеводів.

⁷² Torres ÁL, Rincón F, Bartacek J, Borja R, Jeison D. Challenges for cost-effective microalgae anaerobic digestion. In: Chamy R, ed. Biodegradation – Engineering and Technology. IntechOpen; 2013. <https://doi.org/10.5772/55975>

З перелічених факторів якість клітинної стінки є ключовою для анаеробної ферментації водоростей, оскільки клітинні стінки важко піддаються біодеградації, і їхня наявність перешкоджає контакту анаеробних бактерій із вмістом клітин мікроводоростей.

Клітинна стінка мікроводоростей становить 12–36% від загальної маси клітини в різних видів і складається переважно з вуглеводів та білків, які становлять 30–75% та 1–37% маси стінки відповідно⁸¹.

Більшість зелених мікроводоростей мають складну та стійку клітинну стінку, сформовану полімерною матрицею, що включає уронові кислоти та нейтральні цукри. Ця структура значно обмежує біодоступність органічних компонентів під час анаеробної ферментації. Оцінюється⁷³, що лише близько

40% органічної маси потенційно доступні метановому консорціуму без додаткової обробки, тоді як решта 60% захищена клітинною стінкою та потребує додаткових методів руйнування. Мікроводорості, що легше піддаються біодеградації, зазвичай не мають клітинної стінки або містять білкові структури без целюлози та геміцелюлози. Низька біодоступність деяких видів пов'язана з наявністю алгенану в структурі, який практично не гідролізується й значно ускладнює руйнування клітинної стінки.

Окрім характеристик, що визначають придатність мікроводоростей для анаеробного зброджування, необхідно враховувати й параметри, що впливають на культивування: специфічну швидкість росту та приріст, здатність до різних режимів культивування, стійкість до амонію. Таблиця 5.1 демонструє порівняння деяких популярних видів мікроводоростей, теоретично придатних для виробництва біометану.

⁷³ Rawat I, Ranjith Kumar R, Mutanda T, Bux F. Biohydrogen production by dark fermentation using microalgal biomass as substrate. In: Pandey A, Chang JS, Hallenbeck PC, Larroche C, eds. Biohydrogen. Elsevier; 2013:105–125. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00006-6>

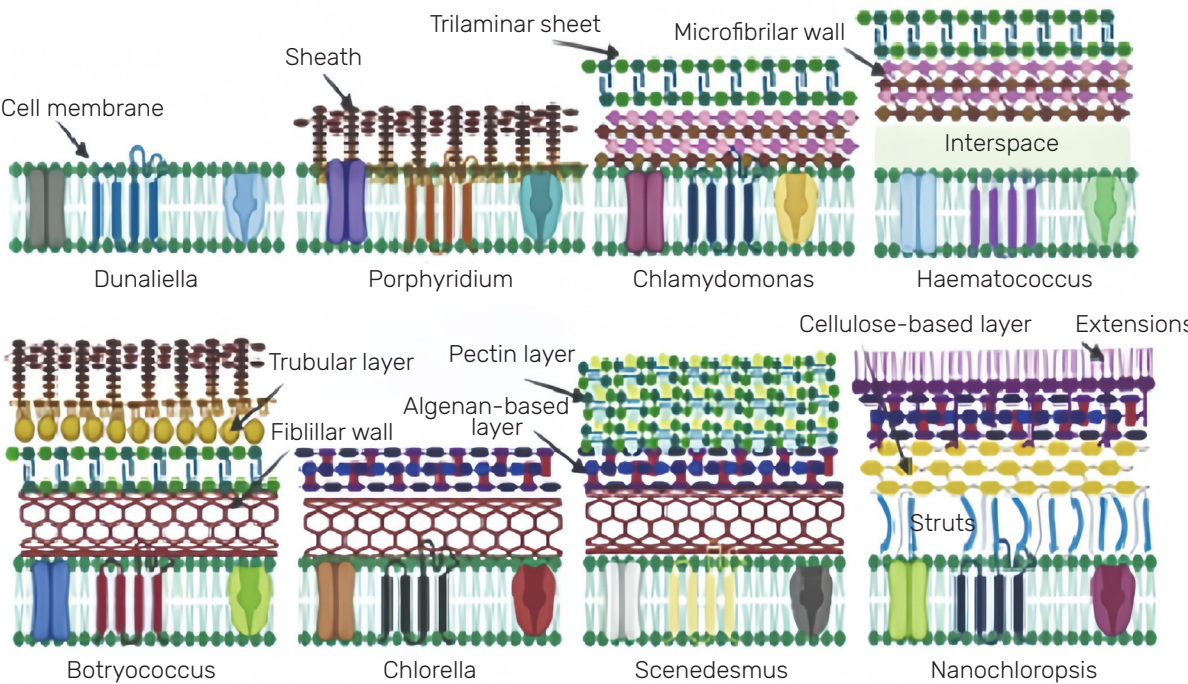


Рис. 5.2 – Порівняння структури клітинної стінки деяких родів мікроводоростей ⁷⁴

⁷⁴ Di Caprio F, Altamari P, Pagnanelli F. Anaerobic digestion of Scenedesmus obliquus biomass grown in batch photobioreactor. Heliyon. 2021;7(7):e07609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07609>

Таблиця 5.1 – Порівняльний аналіз видів мікроводоростей для виробництва біометану

Показник	Тип мікроводоростей							Літ.
	Од.	Dunaliella sp.	Euglena gracilis	Chlamydomonas reinhardtii	Spirulina platensis	Scenedesmus ob.	Chlorella vulgaris	
Складна клітинна стінка	-	Hi	Hi	Hi	Так	Так	Так	[1,8]
Наявність шару алгенану	-	Hi	Hi	Hi	Hi	Так	Так	[1,8]
Наявність шару пептидоглюкану	-	Hi	Hi	Hi	Так	Hi	Hi	[1,8]
Наявність фібрилярного шару	-	Hi	Hi	Hi	Так	Так	Так	[1,8]
Здатність до різних режимів культивування	фото	+	+	+	+	+	+	[6,7]
	міксо	+	+	+	+	+	+	[6,7]
	гетеро	+	+	+	+	+	+	[6,7]
Джерело органічного вуглецю при гетеротрофному культивуванні	-	Ацетат, лактат, глюкоза, глутамат	Ацетат, глюкоза, аланін, аспартат, аспарагін, глутамін, етанол	Ацетат	Глюкоза	Глюкоза	Ацетат Глюкоза Глюкоза Ацетат	[7]
Вміст білків у біомасі мікроводоростей	%	57	39-61	48	46-63	50-56	51-58	[2]
Вміст жирів у біомасі мікроводоростей	%	6	14-20	21	4-9	12-14	14-22	[2]
Вміст вуглеводів у мікроводоростях	%	32	14-19	17	8-14	10-17	12-18	[2]
Вихід CH ₄	л CH ₄ /кг COP	420	325	387	225-293	90-178	90- 310	[2,1,5]
Стійкість до високих концентрацій аміаку та агресивного середовища	-	+	+	+	+	+	+	[4,5]
Питома швидкість росту	доба ⁻¹	0.25 -0.7	0.3 - 1.1	0.5 - 1.5	0.65 - 0.7	0.34 - 0.4	0.38 -4.8	[3]
Продуктивність біомаси	г л ⁻¹ добу ⁻¹	0.12 - 0.5	0.29	0.5	0.15	0.52	0.09	[1,2,8,9]
Гранична концентрація аміаку	мг/л	54	1 000	150	200	15	77 -324	[4,5]

[1] Dragone G, Fernandes BD, Vicente AA, Teixeira JA. Third generation biofuels from microalgae. In: Pandey A, Chang JS, Hallenbeck PC, Larroche C, eds. Biohydrogen. Elsevier; 2013:79-102. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00003-0>

[2] Murphy J, Drosig B, Allen E, Jerney J, Xia A, Herrmann C. A perspective on algal biogas. IEA Bioenergy; 2015. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/09/AD_of_Algae_ebook_end.pdf

[3] Turon V, Trably E, Fouilland E, Steyer JP. Growth of *Chlorella sorokiniana* on a mixture of volatile fatty acids: The effects of light and temperature. FEMS Microbiol Lett. 2017;364(22):fnx262. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx262>

[4] Liu Y, Shi XR, Cui YB, Li M. [Toxic effects of high concentrations of ammonia on *Euglena gracilis*]. Huan Jing Ke Xue. 2013;34(11):4386-4391. Chinese. PMID: 24455949.

[5] Markou Giorgos, Vandamme Dries, Muylaert Koenraad: Ammonia inhibition on *Arthrospira platensis* in relation to the initial biomass density and pH . Bioresource Technology, vol 166, 259-365.

[6] Ward AJ, Lewis DM, Green FB. Anaerobic digestion of algae biomass: A review. Algal Res. 2014;5:204-214. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24455949/>

[7] Chen CY, Yeh KL, Aisyah R, Lee DJ, Chang JS. Microalgal heterotrophic and mixotrophic culturing for bio-refining: From metabolic routes to techno-economics. In: Microalgal Biotechnology: Integration and Economy. Springer; 2017:45-65. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_3

[8] Torres ÁL, Rincón F, Bartacek J, Borja R, Jeison D. Challenges for cost-effective microalgae anaerobic digestion. In: Chamy R, ed. Biodegradation - Engineering and Technology. IntechOpen; 2013. <https://doi.org/10.5772/55975>

[9] Liu W, Wang J, Liu T. Low pH rather than high CO₂ concentration itself inhibits growth of *Arthrospira*. Sci Total Environ. 2019;666:572-580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.312>

З порівняння можна зробити висновок, що найкращими для вирощування біомаси та виробництва біометану є *Euglena gracilis*, *Chlamydomonas reinhardtii*. Вони не мають складної клітинної стінки, характеризуються високим приростом біомаси, а також стійкістю до високих концентрацій амонію й агресивного середовища та високим питомим виходом CH₄. Інші види також придатні для виробництва біометану, однак через складну структуру клітинної стінки та наявність шару алгенану *Chlorella vulgaris* і *Scenedesmus obtusus* потребуватимуть попередньої обробки перед анаеробним зброджуванням. Хоча *Chlorella vulgaris* демонструє найвищу специфічну швидкість росту, вона також здатна витримувати високі концентрації CO₂, що відкриває перспективу використання CO₂ після апгрейду біогазу до біометану без розбавлення повітрям. *Spirulina platensis* має середні показники серед перелічених видів. Морська *Dunaliella sp.* характеризується найкращою біодоступністю й, відповідно, вищим питомим виходом CH₄, але потребує високих концентрацій NaCl для культивування, що може призвести до проблем в експлуатації біогазової установки.

Вибір системи культивування мікроводоростей

Вибір системи культивування безпосередньо впливає на продуктивність біомаси (г/л/день), що, у свою чергу, визначає потенційний

вихід метану з гектара або з одиниці об'єму реактора. Більш продуктивні системи, такі як плоско-пластинчасті чи трубчасті фотобіореактори, забезпечують більші обсяги біомаси мікроводоростей із меншим ризиком контамінації, тим самим гарантують вищий і стабільніший вихід біометану після анаеробного зброджування.

Водночас CAPEX і OPEX систем культивування (таблиці 5.2–5.4) формують загальну собівартість виробництва біометану. Відкриті ставки можуть видаватися дешевшими, однак їхня низька й нестабільна продуктивність знижує вихід метану та підвищує вартість одиниці біометану. Натомість закриті фотобіореактори, хоча й дорожчі в будівництві, забезпечують вищу продуктивність, стабільне постачання біомаси та кращу економіку в перерахунку на одиницю біометану.

Таким чином, проектування систем культивування слід розглядати не лише з точки зору виробництва біомаси, але й як визначальний фактор техніко-економічної ефективності шляхів отримання біометану з мікроводоростей.

Системи культивування можна умовно поділити на дві основні групи: відкриті системи та закриті системи. Відкриті системи зазвичай складаються з великих відкритих ставків, у яких мікроводорості піддаються дії природного сонячного світла.

Таблиця 5.2. Переваги та недоліки систем культивування мікроводоростей ⁷⁵

Система ФБР	Переваги	Недоліки
Відкриті ставки	• Нижчі капітальні витрати • Легко проектувати та обслуговувати • Низький потенціал продуктивності	• Сезонні коливання продуктивності • Високий ризик контамінації • Обмежений контроль параметрів культивування
Фотобіореактори	• Легкий контроль процесу • Малий ризик контамінації • Потенційно висока продуктивність біомаси	• Вищі капітальні та експлуатаційні витрати • Високе енергоспоживання для штучного освітлення

75 Penloglou G, Pavliou A, Kiparissides C. Recent Advancements in Photo-Bioreactors for Microalgae Cultivation: A Brief Overview. Processes. 2024; 12(6):1104. <https://doi.org/10.3390/pr12061104>

Хоча відкриті ставки є економічно вигідними, вони схильні до контамінації й дуже чутливі до неконтрольованих умов навколишнього середовища. Натомість закриті системи культивування передбачають використання закритих фотобіореакторів, які забезпечують контрольоване середовище для вирощування мікроводоростей. Вони захищають від контамінації та дозволяють здійснювати точний контроль параметрів, але можуть бути дорогими в установці та експлуатації.

Вплив споживання енергії на процес виробництва біомаси мікроводоростей, особливо її переробки, також слід враховувати, оскільки саме цей етап є найбільш енергоємним. Для зниження енергоспоживання, а також підвищення продуктивності біомаси мікроводоростей необхідні нові передові технології. Мінімізація витрат на обслуговування та збільшення виробництва мікроводоростей є ключовими факторами, яких слід досягати у довгостроковій перспективі. У таблиці 5.3 наведено структуру витрат на виробництво біомаси мікроводоростей у відкритих системах і закритих фотобіореакторах.

Беручи до уваги наведене вище, можна зробити висновок, що фотобіореактори, незважаючи на їхню вищу вартість, є найкращим вибором для отримання біомаси мікроводоростей для виробництва біометану. Їхні ключові переваги — низький ризик контамінації, вища продуктивність та відсутність сезонних коливань продуктивності. У контексті виробництва біометану фотобіореактори дозволяють досягти найвищої ефективності.

Таблиця 5.3. Структура витрат на виробництво біомаси мікроводоростей ⁷⁶

Система / Стаття витрат	Відкриті системи	Фотобіореактори (ФБР)
Монтаж	15.4 %	82.7 %
Система інокуляції	12.3 %	3.8 %
Земельні роботи	11.3 %	3.5 %
Інфраструктура поза межами основного процесу	10.8 %	3.3 %
Подача CO ₂	6.2 %	1.9 %
Гідрообробка	12.3 %	1.4 %
Збирання МВ	21 %	6.5 %
Екстракція цінних компонентів	8.2 %	2.5%
Рециркуляція	11.8 %	3.6%

Вибір типу фотобіореактора

Фотобіореактори — це складні системи, які забезпечують середовище та необхідні умови для культивування мікроводоростей. Умови культивування регулюються, контролюються та відстежуються для максимізації врожайності біомаси мікроводоростей. ФБР можуть встановлюватися як у приміщеннях під штучним освітленням, так і на відкритому повітрі під дією сонячного світла.

76 Al-Dailami A, Iwamoto K, Ahmad I, Goto M. Potential of Photobioreactors (FBPs) in Cultivation of Microalgae. J Adv Res Appl Sci Eng Technol. 2022;27(1):32–44. <https://doi.org/10.37934/araset.271.3244>

Останнім часом було розроблено та виготовлено десятки нових типів ФБР. Їхні переваги та недоліки безпосередньо впливають на вихід біомаси, собівартість та рівень масштабованості.

Найкращим рішенням є використання плоско-панельних та трубчастих фотобіореакторів. Обидва типи забезпечують високу продуктивність (1,38 та 1,5 г/л/день) та мають середні CAPEX і OPEX, що робить їх оптимальними серед наведених типів. Трубчастий має найкращі гідродинамічні

характеристики, тоді як плоско-панельний краще уловлює світло й має найбільше співвідношення площа/об'єм.

Також гарним варіантом є колонний реактор (1,2 г/л/день), який поєднує простоту, енергоефективність і придатність до міксотрофного культивування.

Найменш придатними є поліетиленові пакети та класичні ферментери: пакети — через низьку продуктивність (0,23 г/л/день), а ферментери — через високе енергоспоживання та значні CAPEX і OPEX.

Таблиця 5.4. Порівняння переваг та недоліків різних типів ФБР ²

Тип ФБР	Переваги	Недоліки	Продуктивність, г/л/день	Орієнтовні витрати
Ферментер	• Відмінне перемішування та аерація • Легке масштабування	• Механічний знос • Високе енергоспоживання • Низьке співвідношення площа/об'єм • Зрізуюче навантаження на клітини	1	Дуже високі CAPEX, високі OPEX
Конічний	• Рівномірний розподіл світла на похилій поверхні	• Складність монтажу • Складність обслуговування і очищення • Затінені ділянки від опорних конструкцій	0.68	Середні або високі CAPEX, середні або високі OPEX
Горизонтальний трубчастий	• Ефективне освітлення • Легке масштабування • Відмінна гідродинаміка • Менша зайнята площа • Високе співвідношення площа/об'єм	• Потрібен відсік для дегазації • Складність очищення • Накопичення розчиненого кисню • Ризик біообростання	1.5	Середні CAPEX, середні або високі OPEX
Вертикальний трубчастий	• Легке масштабування • Відмінна гідродинаміка • Ефективне освітлення • Високе співвідношення площа/об'єм	• Потрібен відсік для дегазації • Високе енергоспоживання • Велика зайнята площа	0.3	Середні CAPEX, середні або високі OPEX
Аерліфт	• Відмінне перемішування • Запобігає осадженню • Низький ризик контамінації • Низьке енергоспоживання • Компактність та простота обслуговування	• Періодичне обслуговування механічних частин • Проблеми з масштабуванням • Можлива нерівномірність освітлення	0.8	Середні CAPEX, середні або високі OPEX

Колонний	- Ефективна аерація та перемішування - Легко масштабується - Низький ризик контамінації - Низьке енергоспоживання - Простота обслуговування	- Можлива нерівномірність освітлення - Необхідний точний контроль подачі газу	1.2	Середні або високі CAPEX, середні OPEX
Поліетиленові пакети	- Простота - Легке масштабування - Легка заміна	- Нерівномірне освітлення - Погане перемішування - Недовговічність - Складність очищення	0.23	Найнижчі CAPEX, низькі OPEX
Плоско-панельний	- Простота обслуговування - Легке масштабування - Короткий світловий шлях - Високе співвідношення площа/об'єм	- Складність підтримки рівномірної температури - Часте очищення - Ризик біообростання - Гідродинамічні навантаження	1.38	Середні або високі CAPEX, середні OPEX
Мембранний	Висока ефективність завдяки утриманню мікроводоростей	- Потребує постійного очищення - Постійний контроль для запобігання контамінації	0.44	Дуже високі CAPEX, високі OPEX
Кільцевий	Оптимізований розподіл світла та зручність	- Потребує очищення - Складність обслуговування	0.22	Середні або високі CAPEX, середні OPEX
Пірамідальний	Конструкція покращує уловлювання світла	Складність обслуговування і очищення	0.172	Середні CAPEX, середні OPEX
V-подібний	Краще захоплення світла	- Складність обслуговування і очищення - Проблеми з орієнтацією відносно сонця	50.5 (г/м²/день)	Середні CAPEX, середні OPEX
Нахилений	- Рівномірне освітлення - Легке масштабування	- Проблеми з орієнтацією відносно сонця - Часте очищення - Складність монтажу	0.276	Середні CAPEX, середні або високі OPEX
Біоплівковий	- Простота збору біомаси - Зменшення ризику контамінації - Ефективне використання щільних культур	- Складність обслуговування - Обмежене перемішування - Контамінація матриці-носія	2.64 (г/м²/день)	Низькі або середні CAPEX, середні або високі OPEX

Параметри та режими процесу

Виробництво енергії з мікроводоростей у поєднанні з біогазом і біометаном має низку переваг. Біомасу мікроводоростей можна напряму зброджувати без енерговитратного сушіння, а отриманий біогаз – збагачувати до біометану для використання як транспортного палива чи подачі в мережу. Мікроводорості також здатні утилізувати CO₂, що виділяється під час апгрейду біогазу, підвищуючи якість кінцевого газу та утворюючи додаткову біомасу. Це створює потенціал замкнутого циклу зростання біометанового виходу⁷⁷.

Перспективи використання мікроводоростей як сировини для виробництва біометану зростають завдяки значному вмісту біодеградованих сполук, а саме: вуглеводів – 4–57%, ліпідів – 2–40% та білків – 8–71% від загальної сухої маси⁷⁸. Однак через значну мінливість складу різних видів мікроводоростей потенціал утворення біометану також суттєво відрізняється між видами.

Біохімічний склад біомаси водоростей можна змінювати шляхом адаптації середовища вирощування. Такі зміни відбуваються внаслідок стресових умов, що виникають під час культивування мікроводоростей у середовищі з обмеженим вмістом поживних речовин. Найвища теплота згоряння – 29 кДж/г біомаси МВ – була зафіксована при вирощуванні в умовах низького вмісту азоту⁷⁹. Високий вміст ліпідів у біомасі може бути перевагою, адже теоретичний вихід біогазу з ліпідів зазвичай вищий, ніж із білків чи вуглеводів. Проте надмірний вміст ліпідів і білків може призводити до накопичення аміаку та довголанцюгових жирних кислот, які є інгібіторами анаеробних мікроорганізмів.

Виміряні питомі виходи біогазу з мікроводоростей коливаються в межах від 287 до 611 л/кг СОР, а питомі виходи метану – від 100 до 450 л/кг СОР ⁸⁰. Попри ці переваги та

77 Ahmad, Imran & Abdullah, Norhayati & Iwamoto, Koji & Yuzir, Ali & Mohamad, Shaza. (2020). Anaerobic digestion of micro algae: Outcomes, opportunities and obstructions.

78 Zabed, H.M., Qi, X., Yun, J., Zhang, H. (2019). Anaerobic Digestion of Microalgae Biomass for Methane Production. In: Alam, M., Wang, Z. (eds) Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8_16

79 Murphy, Jerry & Drosig, Bernhard & Allen, Eoin & Jerney, Jacqueline & Xia, Ao & Herrmann, Christiane. (2015). A perspective on algal biogas. IEA Bioenergy.

потенціал для анаеробного зброджування, перетворення мікроводоростей у біометан ускладнене через стабільність клітинної стінки, низьке співвідношення C/N та вплив інших чинників, зокрема параметрів і умов процесу.

Співвідношення C/N є одним із найважливіших параметрів процесу анаеробного зброджування, і будь-яке суттєве відхилення від оптимального знижує ефективність метаногенезу та вихід метану через вивільнення великої кількості амонійного азоту або накопичення летких жирних кислот. Загалом для ефективного метаногенезу бажане високе співвідношення C/N. Однак залежно від субстрату ефективне значення варіює в межах 20–30, з оптимальним рівнем 25. Біомаса мікроводоростей має низьке співвідношення C/N через високий вміст білків. Крім того, розклад білків призводить до вивільнення значної кількості амонію. Він існує у двох формах: NH₄⁺ та NH₃, причому остання здатна проникати крізь клітинні мембрани та пригнічувати метаногенез. Розподіл між цими формами істотно залежить від температури й pH.

Під час використання морських видів МВ необхідно контролювати солоність. Вміст NaCl понад 10 г/л призводить до 50% зниження активності метаногенезу, і бактерії не здатні адаптуватися навіть за 12 тижнів. За низьких концентрацій у межах 100–350 мг/л натрій потрібний, але його надлишок може спричиняти інгібування чи токсичність, а також дегідратацію бактерій через осмотичний тиск. Для розв’язання цієї проблеми зібрану біомасу необхідно розбавляти або промивати прісною водою⁸⁰.

Час збору та умови зберігання мікроводоростей також впливають на процес анаеробного зброджування (A3) та вихід метану. Вміст біохімічних компонентів постійно змінюється протягом періоду культивування. Збір біомаси мікроводоростей у відповідний момент часу забезпечує найкращу концентрацію основних біохімічних компонентів. Цей момент може значно відрізнитися між видами та штамми мікроводоростей, тому його необхідно встановлювати експериментально⁸¹.

80 Torres ÁL, Fermoso FG, Rincón B, Bartacek J, Borja R, Jeison D. Challenges for cost-effective microalgae anaerobic digestion. In: Chamy R, ed. Biodegradation – Engineering and Technology. Intech; 2013:139–159. <https://doi.org/10.5772/55975>

81 Fermoso, F. G., Hidalgo, C., Trujillo-Reyes, A., Cubero-Cardoso, J., & Serrano, A. (2022). Effect of harvesting time in the methane production on the anaerobic digestion of microalgae. Environmental Technology, 45(5), 827–834. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2128893>

Таблиця 5.5 Порівняння субстратів для сумісного зброджування біомаси мікродоростей

Субтрат	C/N	Кумулятивний вихід біометану, мл CH ₄ /г СОР	Збільшення виходу біометану*	Температура, °С	Тривалість процесу, діб	Літ.
Біомаса <i>Chlorella sp.</i> і <i>Monoraphidium sp.</i> (20%) + пшенична солома (80%)	26.4	289	+12%	37	40	[1]
Біомаса <i>Spirulina platensis</i> (15%) + гній ВРХ (85%)	19	482.54	0%	35	20	[2]
Біомаса <i>Scenedesmus sp.</i> (15%) + свинячий гній (85%)	-	298	-1%	35	40	[3]
Біомаса <i>Nannochloropsis salina</i> (14%) + кукурудзяний силос (86%)	21.2	264	+15%	37	35	[4]
Біомаса <i>Chlorella</i> 1067 (20%) + курячий гній (80%)	8.94	239	+31%	35	29	[5]
Біомаса (85%) + ячмінна солома (15%)	25	347.8	+4.4%	37	30	[6]
Біомаса <i>Arthrospira platensis</i> (45%) + жом буряковий (55%)	25	360.9	-4.3%	37	30	
Біомаса мікродоростей (25%) + харчові відходи (75%)	18.2	514	+28%	35	50	[7]
Біомаса <i>Desmodesmus opoliensis</i> (50%) + м'яса (50%)	10	124.9	+11%	35	30	[8]

* Збільшення виходу біометану означає різницю між кумулятивним виходом біометану ко-субстрату та сумою кумулятивних виходів біометану моно-субстратів цієї суміші.

[1] Solé-Bundó M, Eskicioglu C, Garfí M, Carrère H, Ferrer I. Anaerobic co-digestion of microalgal biomass and wheat straw with and without thermo-alkaline pretreatment. *Bioresour Technol.* 2017;237:89-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.151>

[2] Álvarez X, Arévalo O, Salvador M, Mercado I, Velázquez-Martí B. Cyanobacterial Biomass Produced in the Wastewater of the Dairy Industry and Its Evaluation in Anaerobic Co-Digestion with Cattle Manure for Enhanced Methane Production. *Processes.* 2020; 8(10):1290. <https://doi.org/10.3390/pr8101290>

[3] Astals S, Musenze RS, Bai X, Tannock S, Tait S, Pratt S, Jensen PD. Anaerobic co-digestion of pig manure and algae: impact of intracellular algal products recovery on co-digestion performance. *Bioresour Technol.* 2015;181:97-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.039>

[4] Schwede S, Kowalczyk A, Gerber M, Span R. Anaerobic co-digestion of the marine microalga *Nannochloropsis salina* with energy crops. *Bioresour Technol.* 2013;148:428-435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.157>

[5] Li R, Duan N, Zhang Y, Liu Z, Li B, Zhang D, Lu H, Dong T. Co-digestion of chicken manure and microalgae *Chlorella* 1067 grown in the recycled digestate: Nutrients reuse and biogas enhancement. *Waste Manag.* 2017;70:247-254. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.016>

[6] Herrmann C, Kalita N, Wall D, Xia A, Murphy JD. Optimised biogas production from microalgae through co-digestion with carbon-rich co-substrates. *Bioresour Technol.* 2016;214:328-337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.119>

[7] Ferreira LO, Astals S, Passos F. Anaerobic co-digestion of food waste and microalgae in an integrated treatment plant. *J Chem Technol Biotechnol.* 2022;97(6):1545-1554. <https://doi.org/10.1002/jctb.6900>

[8] Chen X, Mao H, Cui Y, Deng H, Zhao T, Liu J, Huang L, Shen P. An algal regulation-based molasses vinasse anaerobic digestion strategy for enhancing organic matter removal and methane production. *Renew Energy.* 2024;234:121257. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121257>

Ефективність анаеробного зброджування обмежується міцними клітинними стінками, високим вмістом білка та низьким співвідношенням C:N у біомасі. Тому застосування методів попередньої обробки перед подачею мікродоростей у біореактор вважається необхідним для підвищення виходу метану.

Дослідження показують значне збільшення виходу біометану в результаті попередньої обробки мікродоростей. Таблиця 5.7 демонструє специфічні виходи метану для різних видів мікродоростей до та після застосування різних методів обробки.

Фактори, що впливають на вибір методу попередньої обробки:

Штам мікродоростей (товщина клітинної стінки)

Наявність обладнання

Фінансові обмеження (енергія, хімічні реагенти)

Масштаб (лабораторний або промисловий)

Можливий негативний вплив на поживну цінність залишків після ферментації

Таблиця 5.6. Ефективність методів попередньої обробки мікродоростей перед анаеробним зброджуванням (зростання виходу метану наведено у відсотках відносно необробленої біомаси *Chlorella vulgaris*; Cheng та ін., 2015)

№.	Метод попередньої обробки	Опис	Збільшення виходу метану (%)	Особливості / Примітки
1	Термічна обробка	Нагрівання до 120 °С протягом 30 хв	+41%	Руйнує клітинні стінки; активує ферментні процеси
2	Ультразвукова дезінтеграція	Ультразвук ~20 кГц	+36%	Ефективний розпад клітин; високі енергетичні витрати
3	Лужний гідроліз	NaOH (1–2%) при кімнатній температурі	+47%	Покращує доступність білків та полісахаридів; потребує нейтралізації
4	Кислотний гідроліз	HCl або H ₂ SO ₄ (1–2%)	+20–30%	Менш ефективний, ніж лужний; зменшує вміст структурних вуглеводів
5	Механічна дезінтеграція	Подрібнення до дрібної суспензії	+10–15%	Енергоефективно, просто; можна комбінувати з іншими методами
6	Комбінований термо-лужний	Нагрівання (100–120 °С) + NaOH	+70%	Найвища ефективність; потребує значних енергетичних та хімічних ресурсів

Таблиця 5.7 – Специфічний вихід метану до і після попередньої обробки⁷³

№.	Вид мікродоростей	Вихід метану без попередньої обробки, л CH ₄ /кг СОР	Після попередньої обробки	Метод обробки
1	<i>Chlorella vulgaris</i>	196	282 (+44%)	Ультразвукова обробка (35 МДж/кг СР)
2	<i>Arthrospira maxima</i>	210	280 (+33%)	Ультразвукова обробка (35 МДж/кг СР)
3	<i>Scenedesmus sp.</i>	150	300 (+100%)	Термічна обробка (150 °С)
4	Суміш культур	170	190–220	Хімічна обробка (NaOH)

Наприклад, у малих масштабах термічна обробка ефективна для *Chlorella vulgaris*, тоді як для промислових застосувань частіше використовують комбіновані методи (наприклад, лужна + термічна обробка).

Попередня обробка мікродоростей перед анаеробним бродінням є критично важливим кроком для підвищення ефективності перетворення біомаси на біометан. Механічні (ультразвукові) та термічні методи показали найвищу ефективність, збільшуючи вихід метану до 100%. Однак вибір методу має враховувати баланс між енергетичними витратами, наявністю обладнання та типом водоростей. Комбіновані підходи, такі як термо-механічна або хіміко-термічна обробка, демонструють потенціал для подальшої оптимізації процесу.

Інтеграція вирощування мікродоростей у виробництво біометану

Симбіоз вирощування мікродоростей та біогазових установок відкриває шлях до систем замкнутого циклу у біоекономіці, де відходи однієї системи стають ресурсом для іншої. Цей підхід дозволяє:

- зменшити екологічний вплив;
- підвищити ефективність використання поживних речовин;
- створити додаткову цінність з органічних залишків.

Здатність мікродоростей поглинати азот, фосфор та інші сполуки з водного середовища визначається фізіологічними характеристиками виду, зокрема метаболічною швидкістю та потребами у поживних речовинах. У природних умовах мікродорості зазвичай ростуть як консорціум різних штамів і ціанобактерій, здійснюючи складний симбіотичний обмін, асиміляцію та продукцію. Дослідження показали, що різні види мікродоростей можуть зменшувати більше ніж 98% хімічної потреби в кисні (ХСК) та біологічної потреби в кисні (БПК) у стічних водах. Біоремедіація, що здійснюється мікродоростями, допомагає зменшити викиди парникових газів, утворення осаду та є економічно й енергетично ефективною⁸⁷.

87 Bernhard Drosig et al. Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing / IEA Bioenergy, 2015

Підхід очищення рідкої фракції залишків після ферментації через вирощування мікродоростей (біоремедіація залишків) виник як рішення проблеми евтрофікації в Північно-Західній Європі. У цьому регіоні використання залишків як добрива обмежене, що змушує впроваджувати політику зон, вразливих до нітратів, відповідно до Директиви ЄС 91/676/ЕЕС, яка обмежує річне навантаження азоту на орні землі. Амоній є основним поживним елементом для вирощування мікродоростей, і збільшення його доступності та поглинання є критичним для оптимальної біоремедіації.

У виробництві біодизеля, фармацевтики або косметичних продуктів із мікродоростей найдорожчим етапом є екстракція цільових компонентів із середовища культивування та біомаси. Енергія, необхідна для сушіння, складає близько 85% від загального енергоспоживання у процесі виробництва біодизеля з мікродоростей. Однак для виробництва біометану з мікродоростей не потрібна екстракція конкретних компонентів, оскільки біомаса придатна для анаеробного бродіння. У цьому процесі всі органічні сполуки (білки, вуглеводи та ліпіди) у біомасі мікродоростей перетворюються на метан і вуглекислий газ.

Переваги виробництва біогазу з цілісної біомаси мікродоростей:

- вологе бродіння усуває необхідність сушіння біомаси;
- мікродорості можуть покращувати якість біогазу за рахунок біосеквестрації CO₂;
- види мікродоростей з низьким вмістом ліпідів також придатні для виробництва біогазу;
- можливе змішування з іншими типами біомаси, такими як тверді або рідкі відходи.

Умови, необхідні для фототрофного росту мікродоростей, та їх наявність на біогазових установках представлені в таблиці 5.8.

З основних умов потрібних для вирощування мікродоростей наявні майже всі, окрім освітлення, що вирішується встановленням LED ламп.

Впровадження технології вирощування мікродоростей в існуючі біогазові установки видається найбільш ефективним технологічним рішенням для утилізації РФД.

Таблиця 5.8 Умови для росту фототрофних мікродоростей та їх наявність на біогазових установках

Умови, необхідні для росту фотоавтотрофних мікродоростей	Наявність
Необхідне освітлення (сонячне або штучне як, наприклад, LED)	-/+ тільки літом
температура (15–30°C)	+
вода	+
вуглекислий газ (CO ₂)	+
мінеральні нутрієнти (N, P, K) Орієнтовно 1,8 т CO ₂ , 70 кг N, 10 кг P і 8 кг K потрібно для вирощування 1 т біомаси мікродоростей [5]	+

У квітні 2024 р. стартував дослідницький проект: «Виробництво передового біометану з мікродоростей, вирощених на дигестаті біогазових установок», який реалізується консорціумом наступних компаній з України та Великої Британії: Манчестерський університет

(UK адміністративний керівник, технологічний лідер), ALGAECYTES LIMITED (UK, комерційний партнер), ПрАТ «МХП ЕКО ЕНЕРДЖІ» (Україна, комерційний партнер) та Громадська спілка «Біоенергетична асоціація України» (науковий партнер). Проект переміг у конкурсі InnovateUkraine, який фінансується UK International Development та організований посольством Великої Британії в Україні. Основною метою проекту є створити:

- Новий економічний та енергоефективний процес культивування мікродоростей на дигестаті біогазових станцій.
- Новий економічний та енергоефективний процес виробництва біометану за допомогою анаеробного зброджування (AD) зібраних мікродоростей.

На Рис 5.5 показана схема інтеграції культивування МВ на БГУ, яка досліджуватиметься у згаданому проекті InnovateUkraine. Дигестат після анаеробного зброджування в БГУ розділяється на сепараторі на тверду та рідку фракцію. Рідку фракцію направляють у фотобіореактор для вирощування МВ. Культуральну суміш з біомасою МВ подають на змішування з основною сировиною перед подачею в БГУ.

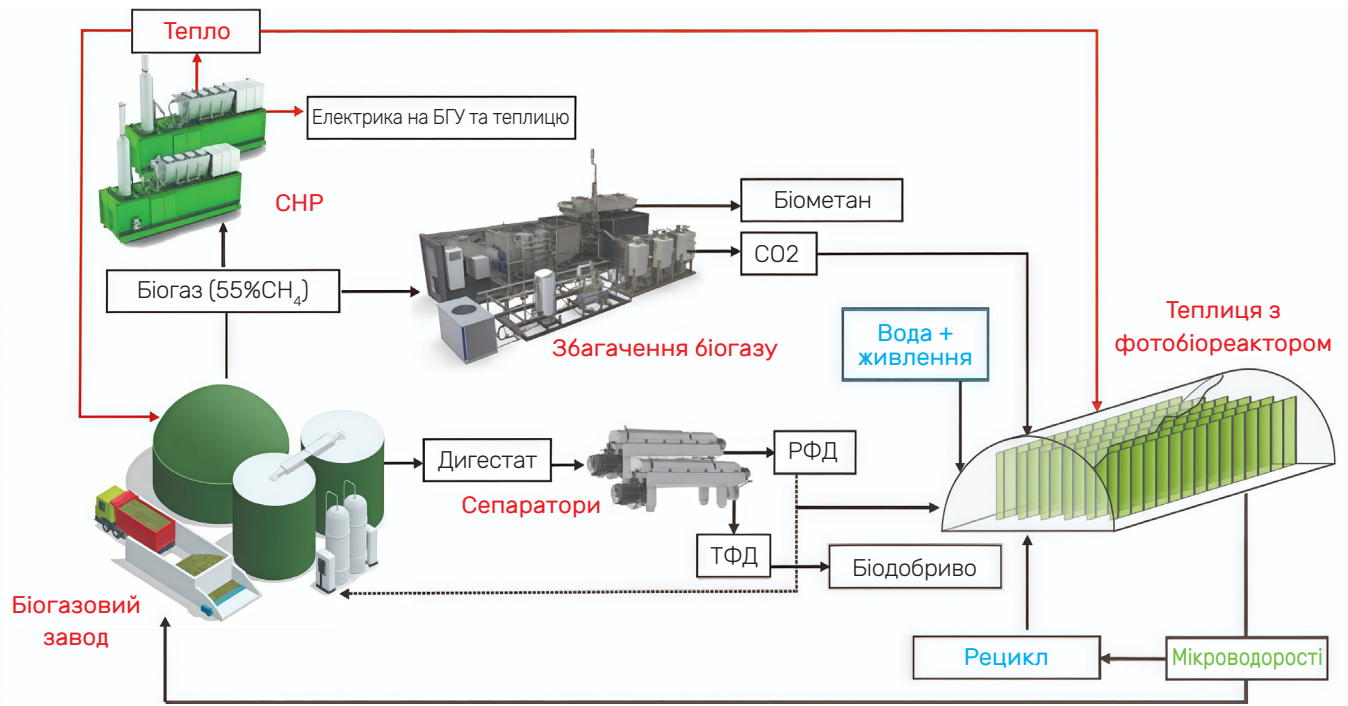


Рис. 5.5 – Схема інтеграції вирощування мікродоростей у біогазову/біометанову установку

Для досягнення економічно вигідного виробництва вдосконаленого біометану з мікродоростей вартість виробництва повинна бути меншою ніж €0.2 за кг сухої маси (DW) мікродоростей. Очікується, що цієї мети буде досягнуто за рахунок:

використання дигестату біогазових установок як безкоштовного джерела вуглецю, поживних речовин і тепла для культивування;

використання CO₂ (побічного продукту виробництва біометану) для росту мікродоростей;

підвищення продуктивності культивування у фотобіореакторах (ФБР) до 5 г/(л•добу) з використанням тонкошарових плоских панельних ФБР

зменшення споживання енергії на виробництво біомаси до 0.02 кВт•год/кг завдяки використанню відпрацьованого тепла, CO₂ та мінімізації потреби в зневодненні, коли мікродорості застосовуються для виробництва біометану;

збільшення ринкової вартості біометану за рахунок зниження його вуглецевої інтенсивності (до від'ємних значень) через використання CO₂ у культивуванні мікродоростей.

Інтеграція вирощування мікродоростей у технологію анаеробного зброджування та виробництва біометану вважається найбільш ефективним і перспективним підходом, оскільки більшість необхідних компонентів – технологічне тепло, CO₂, поживні речовини, вода та транспорт – є практично безкоштовними. Єдиними значними витратами є електроенергія для освітлення, яку можна мінімізувати, використовуючи сонячну енергію, системи зберігання енергії та електроенергію, вироблену з біогазу. Як розраховано для аналогічного проекту у Швеції, анаеробне зброджування біомаси мікродоростей потенційно може збільшити щорічне виробництво біометану на існуючій установці на 9.4%⁸⁸.

Більшість біометанового потенціалу України походить від сільськогосподарської сировини, яка має високий C/N-показник та низький вміст

вологи 10–20%, як-от солома, поживні рештки тощо. Біомаса мікродоростей, залежно від виду та умов росту, містить різні пропорції макромолекул (білків, ліпідів, вуглеводів), які можуть бути перетворені на додатковий біогаз, а згодом і біометан. Використання суспензії мікродоростей для виробництва біогазу не обов'язково потребує концентрування біомаси (відокремлення від рідини), оскільки вологість може бути необхідною для зброджування поживних решток. Відомо, що C/N-показник біомаси мікродоростей зазвичай нижче 10, що є неоптимальним для анаеробного зброджування, але він може допомогти збалансувати цей показник при спільному зброджуванні з поживними рештками, які мають C/N у межах 50–100, що дає кінцеве значення C/N у рекомендованому діапазоні 15–30.

Наприклад, змішування 1 т соломи (CP = 80%, C = 35%, N = 0.5%), яка містить 200 кг води та 800 кг сухої речовини (4 кг N), з 8 т суспензії водоростей, вирощених на дигестаті (CP = 1%, C = 45%, N = 0.15%), яка містить 7920 кг води та 80 кг сухої речовини (12 кг N), дає 9 т суміші субстрату з вологістю 90.3% і співвідношенням C/N 20 – у межах оптимального діапазону (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Параметри суміші: суспензія мікродоростей, вирощених на дигестаті, та солома

Показник	Сировина		
	Солома	Суспензія мікро-водоростей	Суміш
CP, %	80	1	9,8
C/N	70	3,0–9	19,8

Таким чином, спільне зброджування мікродоростей (C/N < 10) з поживними рештками (наприклад, соломою з C/N > 70) дозволяє сформувати субстрат із оптимальним співвідношенням C/N (15–30) та відповідним вмістом сухих речовин (CP) для анаеробного зброджування (10–12%), змішуючи солому з високим вмістом CP (CP ≈ 80%) з біомасою мікродоростей із низькими CP (CP = 1–5%).

Доцільність виробництва біометану з мікродоростей

У виробництві біометану з мікродоростей (MB) ключовими факторами життєздатності є економічна та енергетична ефективність.

З точки зору економічної доцільності, вартість виробленого біометану з MB має бути меншою за можливу продажну ціну такого біометану, з урахуванням собівартості виробництва 1 м³ біометану та мінімальної рентабельності. Таким чином, при продажу біометану з MB за ціною 90 євро/MBт•год, допустима собівартість виробництва MB за умови рентабельності 20% та собівартості виробництва біометану 35 євро/MBт•год становитиме 139–165 євро/т сухої речовини CP) відповідно, при питомому виході метану 320–380 Нм³CH₄/т органічної сухої речовини (COP). За вартості виробництва MB 0.5 євро/кгCP, ціна продажу біометану має становити 202–233 євро/MBт•год, при питомому виході метану з MB 320–380 Нм³CH₄/т CP відповідно. Враховуючи той факт, що поточні ціни на біометан навіть на преміальному ринку ЄС значно нижчі ніж 200 євро/MBт•год, завдання пошуку оптимальних технологічних та концептуальних рішень для виробництва MB з метою одержання біометану, з мінімізацією його собівартості, є надзвичайно важливим.

З енергетичної точки зору, виробництво біометану з MB матиме сенс, якщо енергетичний вихід буде більший за загальне енергоспоживання для їх культивування, збирання, подачі та виробництва біометану. Виробництво біометану (без урахування енергетичних витрат на попередню обробку та подачу сировини) потребує приблизно 0,12–0,18 MBт•год на 1 MBт•год енергії виробленого біометану. При питомому виході метану з MB 320 Нм³CH₄/т COP (3.03 кВт•год/кг CP), загальне енергоспоживання для вирощування, збирання та подачі MB для виробництва біогазу, з урахуванням цільового коефіцієнта надлишкового енергетичного виходу з біометану 1.5, не повинно перевищувати 1.90–1.94 кВт•год/кг CP; при питомому виході 380 Нм³CH₄/т COP (3.6 кВт•год/кг CP) – 2,28–2,32 кВт•год/кг CP. Мінімізація енергоспоживання під

РОЗДІЛ 6

час культивування та збору MB може бути досягнута лише шляхом максимально повного використання енергії сонячного випромінювання як джерела фотонів світла та теплової енергії. В українських умовах це відповідає тепловому періоду року з найвищою інтенсивністю сонячної радіації (травень–вересень).

Виробництво енергії з MB (біогаз, біодизель) є відносно новим напрямом у енергетиці, а виробництво біометану з MB загалом представлено окремими проектами у світі. Мікродорості розглядаються як перспективна сировина для виробництва фармацевтичних препаратів, косметики, нутрицевтиків, тонкої хімії, продуктів харчування та кормів, біопалива, а також для недорогого очищення стічних вод (Borowitzka, 2013; Spolaore et al., 2006). Однак дотепер промислових масштабів досягнуто лише у сегментах з високою доданою вартістю, зокрема для аквакультури та харчування людей. Основною причиною цього є обмежена продуктивність існуючих технологій і надто висока собівартість для низьковартісних ринків: світове виробництво становить близько 20 тис. т/рік при вартості ~20,000 дол. США/т (Benemann, 2013). Для виходу на масові енергетичні та сировинні ринки необхідно збільшити обсяги виробництва до ~10⁴ тис. т/рік і знизити собівартість нижче 0.50 €/кг (Chisti, 2007).

Досягнення цих цільових показників обмежується як біологічними, так і інженерними факторами, а також економічними бар'єрами. Ключові проблеми включають відсутність надійних даних із промислових підприємств (більшість інформації походить з дослідних установок) і відсутність стандартизації технологій (різні штами, режими культивування, географічні умови), що ускладнює порівняння ефективності та формування висновків (Richmond, 2000).

Вартість формується інвестиційними та операційними витратами. Для розрахунку інвестиційних та операційних витрат необхідно знати кінцеву мету та масштаб процесу (тобто

88 Xiaojiao Wang, Eva Nordlander1, Eva Thorin and Jinyue Yan. Microalgal biomethane productionintegrated with an existing biogas plant: a case study in Sweden

виробничу потужність). Виходячи з цього, можна обрати адекватні технології для кожного з необхідних етапів. Нарешті, потрібно отримати перелік основного обладнання. Для розробки детальної технологічної схеми також необхідно знати кінетичні параметри кожного етапу, щоб забезпечити правильне проєктування. Крім того, технологічна схема визначає енергетичні та матеріальні баланси, що полегшує оцінку різних потреб у сировині для процесу.

Інвестиційні витрати у вирощуванні МВ включають вартість основного обладнання та його монтажу, інфраструктури (трубопроводи, електропостачання, будівлі). У таблиці 6.1 наведено огляд наявних даних щодо вартості систем культивування МВ і власне фотобіореакторів.

Виробництво мікродоростей зазвичай включає три етапи: культивування біомаси; збирання та зневоднення; екстракція, фракціонування та трансформація.

Культивування здійснюється у відкритих ставках або у закритих фотобіореакторах (ФБР). Через “розбавлений” характер культур початкові концентрації зазвичай низькі: ~0,5–1,0 г СР/л у відкритих системах і вищі у закритих, де мікродорості зазвичай збирають при 1–4 г/л (залежно від конструкції та умов)⁸⁹.

На етапі збирання та зневоднення механічні процеси доводять вміст сухої речовини до 10–25%; для подальшої переробки за потреби застосовується термічне сушіння (>85% СР). У багатьох інженерних схемах базове згущення до ~20%СР є цільовим показником проєкту⁹⁰. Для виробництва біометану згущення до таких концентрацій не є обов’язковим, що є очевидною перевагою цього напрямку застосування суспензії з вирощеними мікродоростями.

Найбільшими статтями енергоспоживання є аерація/подача CO₂, перекачування/циркуляція суспензії, штучне освітлення (для інтенсивних або закритих систем) та зневоднення. За узагальненими техніко-економічними оцінками, операційні витрати та споживання електроенергії на етапі збирання/зневоднення становлять у межах 0,5–2,0 €/кг та 0,2–5 кВт•год/кг (залежно від технології та цільової якості продукту)⁹¹.

89 [BioMed Centralieabioenergy.comosti.gov](#)

90 [\(PDF\) Harvesting, Thickening and Dewatering Microalgae Biomass](#)

91 [Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems – ScienceDirect](#)

Моделі уряду США для відкритих прибережних ферм (nth-plant) показують цільові мінімальні ціни продажу біомаси (MBSP) близько \$450–700 за тону сухої речовини за поточного рівня технологій, з очікуваним зниженням до 0,49 €/кг завдяки підвищенню продуктивності, інтеграції потоків та зменшенню витрат. Це підкреслює, що конкурентоспроможність як палива можлива лише за дуже низької собівартості або у комбінації з виробництвом ко-продуктів⁹².

Попит на мікродорості як сировину значно залежить від сегмента ринку: ринки дешевої енергії вимагають низької вартості біомаси (≤0,5 €/кг сухої речовини), тоді як харчові, косметичні та нутрицевтичні продукти допускають значно вищі ціни за кг, але з нижчими обсягами. Аналіз DOE (Billion-Ton Report 2023) використовує порогове значення ≤1000 €/т СР як орієнтир для можливості широкого впровадження у паливні ланцюги⁹².

Стратегічні огляди IEA-Bioenergy визначають високу вартість культивування, яка все ще перевищує прийнятні межі для масових паливних ринків, як головний бар’єр для комерціалізації. Підхід “біорефінерії” з виробництвом ко-продуктів і використанням відходів (вода, поживні речовини, CO₂) розглядається як шлях до зниження витрат⁹³.

Для схеми культивування на біометанових заводах (подача CO₂ від збагачення біогазу, використання тепла дигестату 38–42 °C, надходження поживних речовин разом із дигестатом) ключові ефекти такі:

відсутність витрат на стиснення/барботаж (якщо тиск газу вже достатній) і заміна частини мінеральних добрив потоком дигестату. Це безпосередньо знижує OPEX порівняно зі стандартними системами з окремою закупівлею CO₂ та солей⁹⁴.

зменшення теплових витрат завдяки утилізації тепла дигестату; для помірних/холодних кліматів підтримання температури культури >25 °C суттєво впливає на енергетичний баланс. Огляди вказують, що кліматичні умови та контроль температури є чутливими драйверами витрат⁹⁵.

92 [PNNL-32695](#)

93 https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/01/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-20170114.pdf?utm_source

94 [Key Targets for Improving Algal Biofuel Production](#)

95 [Microalgae cultivation: photobioreactors, CO2 utilization, and value added products of industrial importance – Shekh – 2022 – Journal of Chemical Technology & Biotechnology – Wiley Online Library](#)

Таблиця 6.1 – Приклади вартості фотобіореакторів та систем на їх основі з відповідними даними, посиланнями та примітками

Тип фотобіореактора (ФБР)	Питома вартість ФБР	Вартість інших компонентів	Примітки	Джерело
Трубчасті, 250, 750, 1500 та 18000 л	Загальна ціна систем, включаючи ФБР: від 120 тис. євро/м³ для систем об’ємом 250 л до 8 тис. євро/м³ для систем об’ємом 18,000 л	–	На основі теоретичних розрахунків	DOI:10.1016/j.aquaculture.2020.735310
“Green Wall Panel-II” (GWP®-II) – див. рис. 1. Один реактор складається з 24 панелей довжиною 48 м. Загальна площа панелей – 800 м²; зайнята земельна площа – 1250 м²; об’єм – 39,4 м³	79 євро/м² площі панелей	Трубопроводи, арматура, клапани, резервуари – 28% від вартості ФБР; обладнання та машини – 75%; електрообладнання, контрольно-вимірювальні прилади й системи – 54%	На основі реалізованої установки	DOI:10.1016/j.algal.2016.09.005
Трубчастий ФБР, плоско-панельний ФБР	Трубчастий – 86 євро/м², плоско-панельний – 101 євро/м²	–	На основі теоретичних розрахунків	acrres.nl
Трубчастий ФБР	5000 євро/м³	Інше обладнання – 44% від вартості ФБР	На основі реалізованої установки	DOI:10.1016/j.biotechadv.2012.02.005
Горизонтальні трубчасті реактори на базі модулів типу МК1-18.000. Кожен модуль складається з 24 паралельних петель довжиною 120 м до U-подібних вигинів із нахилом 0,5%. Об’єм модуля – 18 м³, площа – 625 м².	6762 євро/м³	Інше обладнання – 51% від вартості ФБР	На основі реалізованої установки	UCA Techno-economic analysis

Оцінка ризиків

Попри значний потенціал синергії між мікробактеріями та біогазом для сталого розвитку, впровадження цієї технології стикається з низкою технічних, економічних

та регуляторних викликів, що потребують комплексного управління ризиками як на етапі планування, так і під час експлуатації. Оцінка ризиків інтеграції вирощування мікробактерій і біогазових заводів наведена в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Оцінка ризиків інтеграції вирощування мікробактерій та біогазових установок

Назва ризику	Опис ризику	Потенційні наслідки	Рекомендовані заходи
1. Технічні ризики			
Надмірна концентрація NH ₄ ⁻	Дигестат має високий вміст амонію, токсичний для мікробактерій	Пригнічення росту або загибель культури	Розведення, аерація, попередня обробка
Зміна складу дигестату	Коливання складу вхідної сировини на біогазовій установці	Нестабільне живильне середовище для мікробактерій	Постійний моніторинг, стандартизація партій
Недостатній рівень CO ₂	Нестабільна генерація чи постачання CO ₂ від когенерації	Зниження фотосинтезу, уповільнення росту	Буферне накопичення CO ₂ або дозування з балонів
Світловий режим	Недостатнє природне освітлення або нерівномірність	Низька продуктивність фотосинтезу	Використання штучного освітлення, LED
2. Екологічні ризики			
Утворення залишків/відходів	Невикористана мікробактеріальна біомаса або продукти метаболізму	Потенційне забруднення, необхідність утилізації	Включення в біогазовий цикл або агроцикл
Ризики біозараження	Контамінація культури (бактерії, гриби, інші мікробактерії)	Зниження якості/продуктивності	Стерильні умови, моніторинг культури
Витік дигестату	При транспортуванні/зберіганні	Загроза для ґрунтів, вод	Гідроізоляція, контроль витоків
3. Економічні ризики			
Висока вартість CAPEX	Встановлення фотобіореакторів або відкритих ставків	Подовження терміну окупності	Державна підтримка, гранти
Мінливість ринку збуту	Нестабільний попит на продукти (біопаливо, протеїн, CO ₂ -кредити)	Неможливість реалізації продукції	Контрактне партнерство, диверсифікація
Залежність від погодних умов	Для відкритих систем – сезонність освітлення, температур	Зниження виробничої потужності в зимовий період	Частковий перехід на закриті системи
4.Регуляторні та юридичні ризики			
Невизначеність статусу продукту	Біомаса мікробактерій може не мати чіткої категорії (корм, добриво, біопаливо)	Витрати на сертифікацію, обмеження експорту	Вибір найлегшого шляху реалізації
Екологічні дозволи	Вплив на довкілля, водокористування, викиди CO ₂	Затримки реалізації проекту, штрафи	Попереднє узгодження з регуляторами

Інтегровані пілотні проекти з утилізації CO₂, вирощування мікробактерій та виробництва біометану/біогазу

З огляду на потребу підвищення ефективності біоенергетичних систем в Україні – особливо в контексті енергетичної децентралізації та управління відходами – використання дигестату біогазових установок як середовища для вирощування мікробактерій набуває стратегічного значення. Ця технологія не лише замикає біологічні цикли, але й відкриває потенціал для виробництва високоефективного біометану та додаткових цінних продуктів, таких як білки та пігменти.

Нижче наведено аналіз найбільш успішних європейських пілотних проектів, які можуть бути адаптовані до українських умов. Інтеграція досягається шляхом використання дигестату як поживного середовища. Після розділення на тверду і рідку фракції, рідка частина дигестату містить значні кількості азоту, фосфору та мікроелементів, необхідних для росту водоростей.

РОЗДІЛ 7

Мікробактерії здатні:

засвоювати CO₂, що утворюється під час анаеробного зброджування;

накопичувати ліпіди, вуглеводи та білки (до 30–50% сухої речовини) для подальшої конверсії у біометан або біодизель;

використовувати залишкову біомасу після ферментації як добриво для ґрунтів або корм для тварин.

Огляд міжнародних пілотних проектів

Кейс: Словенія – демонстраційний центр AlgaeBioGas- <https://algaebiogas.eu/>

У Словенії, в межах проекту *AlgaeBioGas*, реалізовано демонстраційний центр, який інтегрує водоростеву культивуацію до існуючої біогазової установи (БГУ) потужністю 1 МВт, що працює переважно на кукурудзяному силосі. Мета ініціативи – забезпечення повного замкнутого циклу використання поживних речовин з дигестату, повторне використання вуглецевих викидів і створення додаткової біомаси як енергетичного ресурсу.



Рис. 7.1 – Фото демонстраційного центру проекту AlgaeBioGas у Словенії реалізований на діючій біогазовій установці



Рис. 7.2 - Фото демонстраційного центру проекту AlgaeBioGas у Словенії реалізований на діючій біогазовій установці, в правому куті фото консорціуму мікроводоростей з даної установки

Біореакторна система складається з двох відкритих водоростевих ставків:

- основний ставок площею 100 м²;
- інокуляційний ставок для стартових культур – 10 м².

Розташування об'єкта в теплиці дозволяє забезпечити стабільні мікрокліматичні умови та зменшити сезонні втрати продуктивності.

Принципова схема процесу наведена на рис 7.3 і складається з наступних технологічних операцій:

- Дигестат з рідкої фракції БГУ постійно або періодично подається до основного ставка.
- Культивується водоростево-бактеріальна біомаса, здатна поглинати азот, фосфор, CO₂.
- Біомаса збирається щоденно через відстійник і перекачується до біогазової установки як вторинний субстрат.
- Залишкова вода після зневоднення біомаси може бути або скинута до навколишнього середовища після контрольованої очистки, або повернута до циклу.

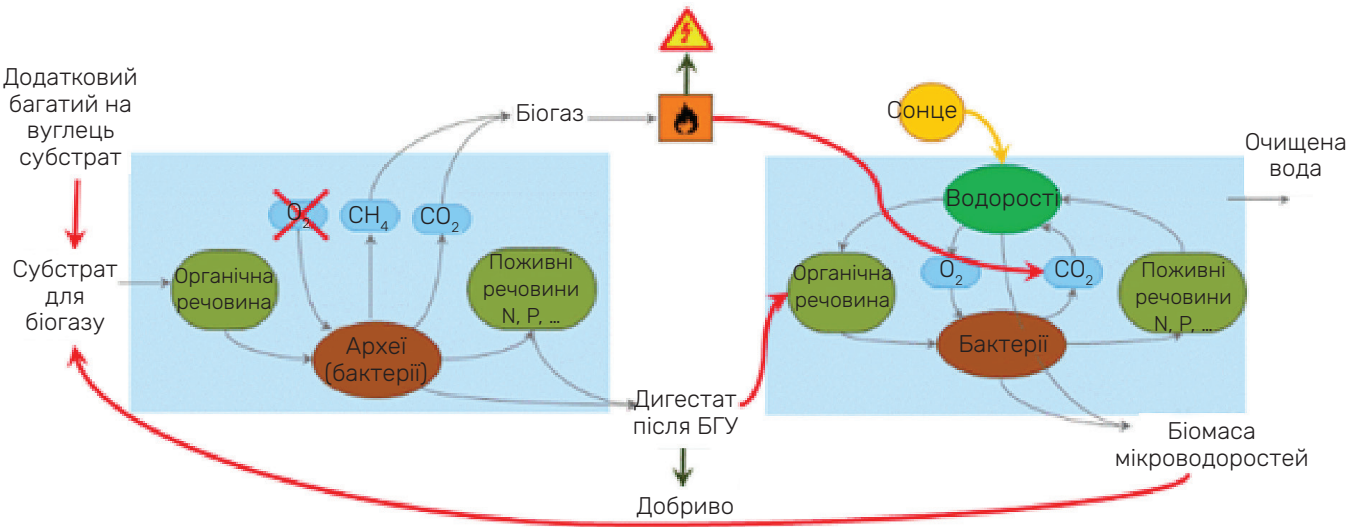


Рис. 7.3 - Принципова схема процесу проекту AlgaeBioGas

Таблиця 7.1 Узагальнена таблиця параметрів проекту AlgaeBioGas

Категорія	Параметр	Значення / Характеристика
Загальна характеристика	Країна реалізації	Словенія
	Тип БГУ	1 МВт, кукурудзяний силос
	Тип системи культивуції	Відкриті ставки у теплиці (100 м² + 10 м²)
Очищення дигестату	Обсяг обробки рідкого дигестату	30 м³/га/день
	Вміст ХСК (COD) у дигестаті	~8 000 мг O ₂ /л
	Ефективність видалення органіки	До 94%
	Видалення фосфатів / азоту	Висока, значне зниження концентрацій
	Вплив на запах	Суттєве зменшення запаху
Продуктивність біомаси	Щорічне виробництво біомаси	30–40 т СР/га/рік
	Тип біомаси	Водоростево-бактеріальна
	Подальше використання біомаси	Як субстрат для біогазу, добриво або корм
Екологічний ефект	Утилізація CO ₂ з БГУ	~240 т/рік з 13 000 т викидів
	Еквівалентне заміщення площ під кукурудзу	9–27 га (замість 335 га загальних потреб)
	Скорочення викидів CO ₂ від обробки дигестату	~1 100 т CO ₂ /рік
	Скорочення NOx та N ₂ O	Так, значне
Технологічні обмеження	Світлова залежність	Висока – критичний фактор, особливо через колір дигестату
	Температурний режим	Оптимізовано за рахунок теплиці
	Необхідність попередньої обробки дигестату	Бажано (освітлення, фільтрація, корекція рН)
Інфраструктурні умови	Площа для системи очищення	3–5 га на установку потужністю 1 МВт
	Повторне використання води	Так, можливе
	Ринки збуту	Країни ЄС з обмеженнями на внесення дигестату (Німеччина, Італія, Швеція)

Проект AlgaeBioGas демонструє високу інтеграцію технології БГУ та біоочистки з мікроводоростями, забезпечуючи:

- глибоке очищення дигестату,
- генерацію додаткової біомаси,
- суттєве зниження викидів CO₂,
- економію земель під вирощування кормових культур.

Ця модель є повністю адаптованою до умов України, особливо в регіонах з високою концентрацією агровиробництва.

Кейс: ALG-AD – Інтеграція анаеробного зброджування та вирощування мікродоростей УК, Франція, Бельгія.
<https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/alg-ad-creating-value-from-waste-nutrients-by-integrating-algal-and-anaerobic-digestion-technology/>

Проект ALG-AD був реалізований у рамках програми Interreg North-West Europe з метою інтеграції систем анаеробного зброджування з культивацією мікродоростей. Основне завдання – знайти ефективне рішення для переробки надлишку нітроген-насиченого дигестату, який не може бути внесений на поля в якості добрива через екологічні обмеження в ЄС. Проект реалізовувався на трьох пілотних об'єктах Велика Британія (Суонсі), Франція (Бретань), Бельгія (Фландрія). Ці майданчики охоплювали різні типи субстратів для анаеробного зброджування, включно з харчовими та сільськогосподарськими відходами, і використовували різні конфігурації фотобіореакторів для оцінки продуктивності культивації водоростей на попередньо обробленому дигестаті. На рис 7.4. наведено фото пілотних майданчиків, фотобіореакторів та типу мікродоростей які вирощували під час реалізації даного проекту.

Проблему яку вирішує проект – регуляторні обмеження на внесення дигестату, зростання обсягів його накопичення, потреба в екологічній утилізації.

Рішення – культивування мікродоростей на основі рідкої фракції дигестату з подальшим

використанням біомаси як кормового протеїнового концентрату, біогазового субстрату або сировини для біопереробки.

У таблиці відображено ключові технічні, біологічні та інфраструктурні параметри для 3-ох проектів ALG-AD.

Технологічний процес ALG-AD

Підготовка дигестату: освітлення, фільтрація, регулювання pH, зниження вмісту аміаку, запобігання інгібуючим ефектам.

Культивация водоростей: у фотобіореакторах або відкритих системах (залежно від сайту). Використання CO₂ з біогазових установок.

Збір біомаси: центрифугування або фільтрація. Подальше зневоднення.

Оцінка безпеки та якості: Вміст патогенів, важких металів, токсинів.

Використання біомаси: Протеїновий корм, добриво, біоенергетика (біометан).

Підсумкові висновки ALG-AD

Мікродорості можуть ефективно культивуватись навіть на низьких концентраціях дигестату, за умови попередньої очистки та стабілізації.

Тип попередньої обробки LF критично впливає на результати вирощування, зокрема на освітлення, pH та вміст аміаку.

Системи з об'ємом 3 000 л довели технічну життєздатність масштабування, особливо у фермерських умовах або на малих біогазових підприємствах.

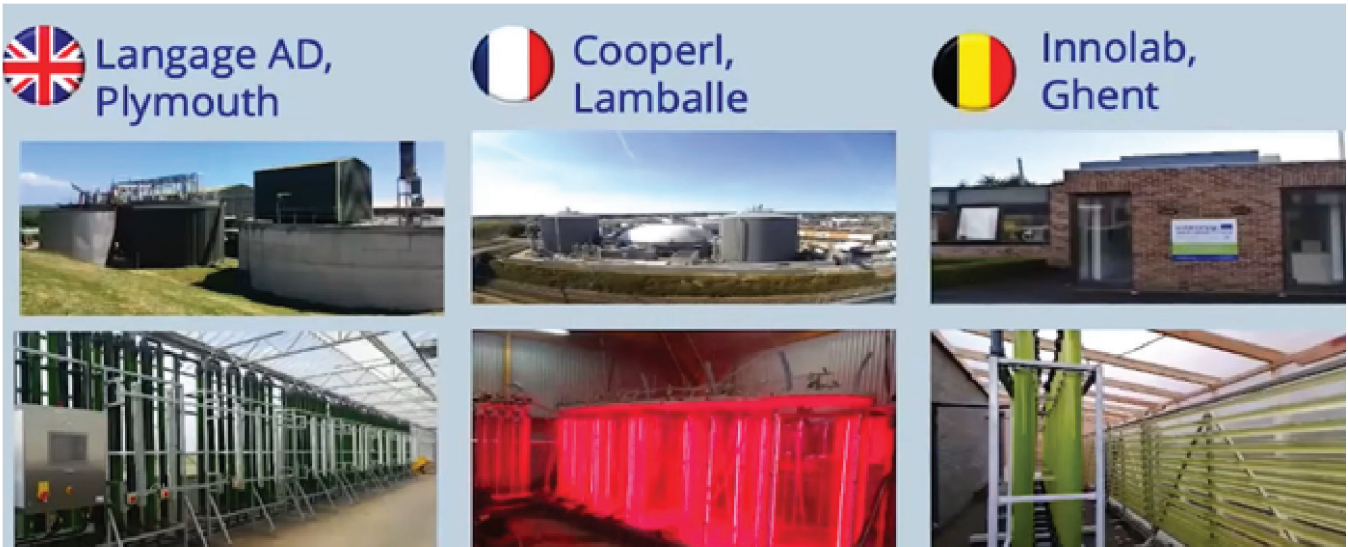


Рис. 7.4 – Фото пілотних майданчиків проекту ALG-AD

Таблиця 7.2 – Інтегрована таблиця порівняння трьох пілотних майданчиків проекту ALG-AD (Interreg North-West Europe)

Параметр	INNOLAB (Бельгія)	Langage AD (Велика Британія)	Бретань (Франція)
Тип БГУ, сировина	Харчові та сільськогосподарські відходи	Біогазова станція (фермерська)	Агропромислова
Тип дигестату	Рідка фракція після DAF та фільтрації	Рідка фракція	Рідка фракція
Попередня обробка дигестату	Центрифугування, DAF, паперовий фільтр 10 мкм, розбавлення водою в пропорції 9:1 (вода/дигестат)	Відстоювання, фільтрація, розбавлення до 1%	Відстоювання
Система культивування	Фотобіореактор трубний вертикальний + горизонтальний – 3000 л	Вертикальний біореактор 2500 л	Горизонтальні біореактори 6×500 л (3000 л)
Види мікродоростей	<i>Chlorella sp.</i> , <i>Desmodesmus sp.</i>	<i>Chlorella sp.</i> , інші місцеві штами	<i>Chlorella sp.</i> , <i>Scenedesmus sp.</i>
Тривалість культивування	14 днів	14–21 днів	2 днів
Режим культивування	Фотоавтотрофний	Фотоавтотрофний та міксотрофний	Гетеротрофний
Температура вирощування	17–23 °C	Контрольована (теплична)	Зовнішнє регулювання
Освітлення	LED, 100 мкмоль/м²/с, 16:8 (світло: темрява)	LED, теплиця, природне світло	Природне + допоміжне освітлення
Щільність культури (макс.)	~21 800 клітин/мкл	Не вказано, помірна	Висока (залежно від періоду)
Вихід біомаси (оцінка)	~0,3 г/л/добу (у лабораторії)	0,06 г/л/добу – фото автотрофний, 1,6 г/л/добу – міксотрофний ~20–30 т СР/га/рік (оцінка)	~30–40 т СР/га/рік (оцінка)
Концентрація біомаси	1,7 г/л	1–13 г/л	5,37 г/л
Подальше використання біомаси	Кормовий білок, дослідження	Корм або біогаз	Біогаз, добрива
Особливості	Детальний контроль, параметричні дослідження	Повнофункціональна фермерська станція	Промислове масштабування

Chlorella sp. та *Desmodesmus sp.* – рекомендовані штами для Європи з погляду стійкості та біомаси.

INNOLAB: підходить для параметричної оптимізації; застосовується батч-культивация з точним контролем умов.

Langage AD (Великобританія): демонструє реальну операційну стійкість напівперіодичної системи у фермерському середовищі.

Бретань (Франція): єдина платформа з автоматизованою проточною моделлю, яка найближча до промислового масштабування.

Кейс: ALL-GAS (Іспанія) – масштабне виробництво біопалива з мікроводоростей на основі муніципальних стічних вод
<https://www.all-gas.eu/>

Проект ALL-GAS, підтриманий Європейською Комісією в межах 7-ї Рамкової програми (FP7), є першим у світі прикладом повномасштабного застосування мікроводоростей для виробництва біопалива на основі очищення

Таблиця 7.3 Параметри проєкту ALL-GAS

Параметр	Значення / Характеристика
Локація	Чіклана-де-ла-Фронтера, Іспанія
Площа культивації	До 4 га
Джерело поживних речовин	Муніципальні стічні води
Тип культивування	Відкриті каналні ставки, гравітаційна циркуляція
Типи водоростей	<i>Scenedesmus</i> , <i>Chlorella</i> , місцеві штами
Продуктивність біомаси	~100 т сухої речовини/га/рік
Вміст ліпідів у біомасі	~20% (для перетворення на біодизель)
Біопаливний потенціал	До 40 автомобілів/га/рік (20 – біодизель, 20 – біометан)
Супутні продукти	CO ₂ , очищена вода, біопродукти
Особливості проекту	Повна замкнена система: стоки → водорості → енергія → очищена вода
Тип застосування	Транспортні потреби муніципалітету, зменшення витрат на очистку стічних вод

стічних вод. Проєкт реалізовано в муніципалітеті Чіклана-де-ла-Фронтера (Іспанія), на території діючих очисних споруд.

Мета проекту – інтегрувати цикл очищення стічних вод із виробництвом біопалива. Замінити частину викопного пального екологічно нейтральною альтернативою – біодизелем та біометаном з мікроводоростей. Параметри проекту наведено в таблиці 7.6.

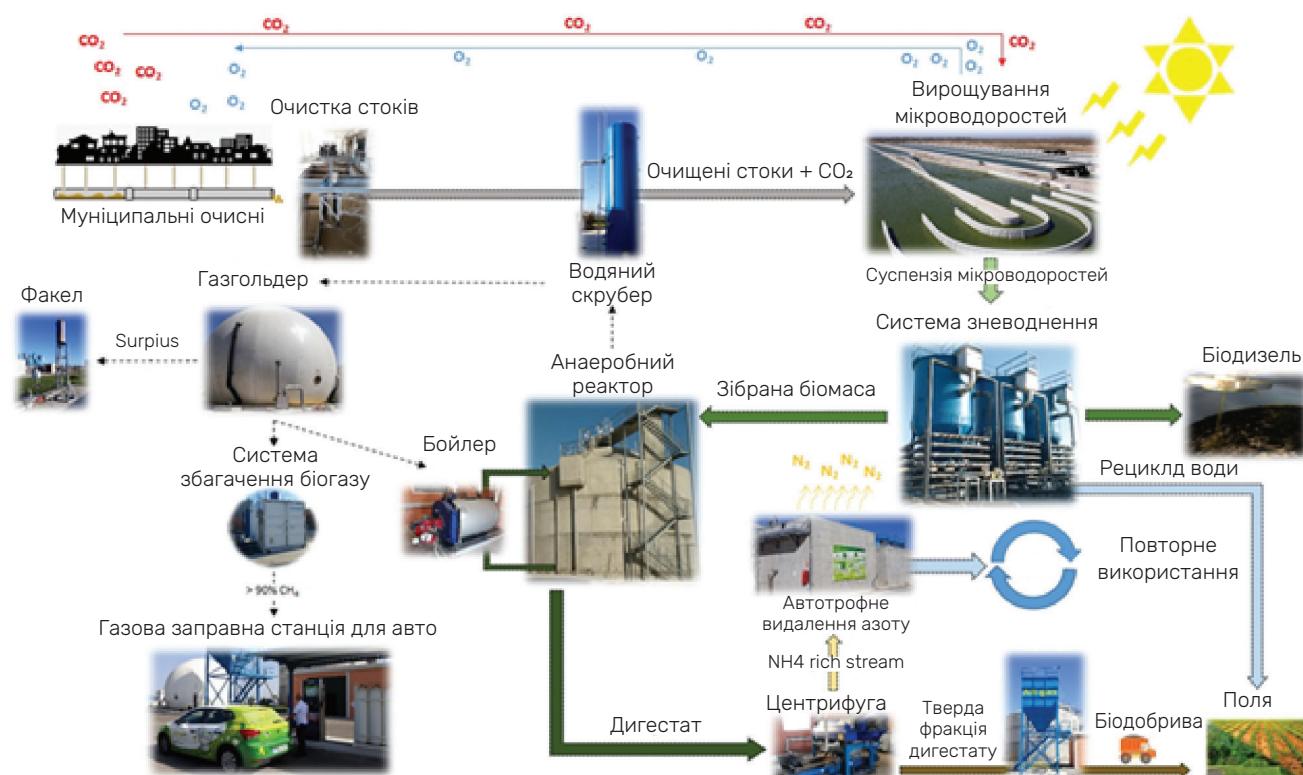


Рис. 7.5 - Схема проекту ALL-GAS

Виробництво передового біометану
з мікроводоростей, вирощених на дигестаті
біогазових установок в Україні

Цикл ALL-GAS включає:

Подачу стічної води з очисної споруди у відкриті ставки/канали (до 4 га).

Культивуацію мікрроводоростей у воді, багатій на органічні речовини, азот і фосфор.

Збір та сепарацію біомаси, що накопичує ліпіди та біометановий потенціал.

Обробку біомаси:

Ліпідна фракція → трансестерифікація → біодизель.

Рештки та активний мул → анаеробне зброджування → біометан + CO_2 , очищення та компресія біогазу → паливо для транспорту

ALL-GAS показав можливість використання очищених стічних вод і дигестату як поживного середовища для мікроводоростей, з подальшим виробництвом біометану для транспорту. Важливо, що проєкт реалізував повний цикл – від вирощування біомаси до її зброджування. В Україні такий підхід може бути актуальним для муніципалітетів, особливо в контексті децентралізованої енергетики та інтеграції з очисними спорудами.

Загалом, міжнародний досвід підтверджує доцільність інтеграції вирощування мікроводоростей на дигестаті як елементу кругової економіки біогазових станцій. Це дозволяє не лише зменшити вплив на довкілля, а й створити нові потоки доданої вартості у вигляді біометану, добрив чи біопродуктів.

ALGADISK – модульна система вирощування водоростей на димових газах у плівковому біореакторі (Іспанія, FP7), прототип встановлено BFC Biogas Plant, Almazán (Іспанія) <https://cordis.europa.eu/project/id/286887/reporting/es>

Проект ALGADISK (№286887, FP7) мав за мету створити інноваційний фотобіореактор на основі біоплівки, що забезпечує:

Високу концентрацію біомаси при низьких витратах енергії та води;

Повну інтеграцію з викидами CO₂ з ТЕЦ, біогазових установок чи іншого промислового джерела;

Автоматизоване управління і збір біомаси,
мінімальне людське втручання.

Установка ALGADISK працює за принципом обертового плівкового фотобіореактора, в якому вертикальні диски частково занурені у поживне середовище, збагачене CO_2 з відхідних газів біогазової установки або ТЕЦ. На поверхні цих дисків закріплюються мікроводорості, які під час повільного обертання дисків чергуються між перебуванням у рідині, де поглинають поживні речовини, та в повітрі, де здійснюють фотосинтез. Система оснащена сенсорами для контролю рН, температури, рівня освітленості, вмісту CO_2 та інших параметрів, що забезпечує стабільний ріст біомаси. Через кожні кілька днів біоплівка з мікроводоростями механічно знімається з поверхні дисків. Отримана біомаса має високу концентрацію (до 100 г/л), що мінімізує потребу в енергозатратному зневодненні. Зібрана сировина далі може бути використана для виробництва біометану, органічних добрив або кормових домішок, створюючи замкнений, енергоефективний та екологічний цикл. На рис. 7.6 наведено принципову схему установки вирощування мікроводоростей.

У таблиці 7.4. наведені основні параметри роботи проекту ALGADISK: технічні характеристики, продуктивність, екологічно-економічні характеристики.

Систему ALGADISK технічно доцільно впроваджувати на біогазових установках. Підходить для утилізації відпрацьованих газів та мінералізованого дигестату в замкнених агропромислових циклах. Перевагою є низькі енерговитрати, висока концентрація біомаси, мінімізація водоспоживання та автоматизованість, але технологія потребує адаптації та практичного відпрацювання, зокрема – розміщення в теплиці через погодні умови в Україні та додаткового джерела освітлення в зимовий період.

Таблиця 7.4 Зведена таблиця: Проект ALGADISK (Іспанія, FP7)

Категорія	Параметр	Значення / Характеристика
Технічна концепція	Тип реактора	Модульний біоплівка –диск (обертові вертикальні диски)
	Матеріал поверхні дисків	Полімер з біосумісним покриттям для адгезії водоростей
	Механіка	Диски частково занурені, повільно обертаються для чергування світло/тінь
	Джерело CO ₂	Димові гази з біогазової установки (BFC, Almazán) або балонний резерв
	Управління	Автоматизована система: контроль pH, температури, освітлення, CO ₂ , живлення
	Додаткові компоненти	Система піногасіння, буферна ємність, теплообмінник, дозатори CO ₂ та живлення
	Аварійні стани	Заблоковане обертання → висихання біомаси; резервне живлення для безпеки
	Модульність	1 блок керування на 10 реакторів; легко масштабований
Параметри продуктивності	Вид мікродоростей	<i>Chlorella sorokiniana</i>
	Середній вихід біомаси	18–20 г/м²/добу (6–7 місяців на рік); до 21,8 г/м²/добу (червень)
	Добова продуктивність (реактор)	~182 г/добу або 5,4 кг/місяць/реактор
	Щільність біоплівки	100–150 гСР/л
	Концентрація після збору	До 89–100 г/л без потреби в додатковому зневодненні
	Частота збирання	Кожні 2–3 дні, напівавтоматично
	Поглинання CO ₂	~0,17 нм³/день (7,57 моль л С); ефективність 20–100% залежно від навантаження
	Споживання азоту (N)	~14,8 г/день
	Споживання фосфору (P)	~2,6 г/день
Еколого-економічні аспекти	Енергоспоживання	2,2–3,5 кВт•год/день (пілотна установка); потенційно менше при масштабуванні
	Вартість системи	<10 тис. € / 100 кгСР / рік (орієнтовно)
	Вартість продукції	~50 €/кгСР (значно нижче комерційних ФБР систем)
	Ринок збуту	Біодобрива, преміум-корма, БАДи, біоенергетика
	Водоспоживання	Низьке — завдяки фіксації біомаси у біоплівці
	Скорочення CO ₂	Ефективне біопоглинання з газової та рідкої фази
	Кліматичні обмеження	Не рекомендовано для холодного клімату; потрібна теплиця або сезонна робота

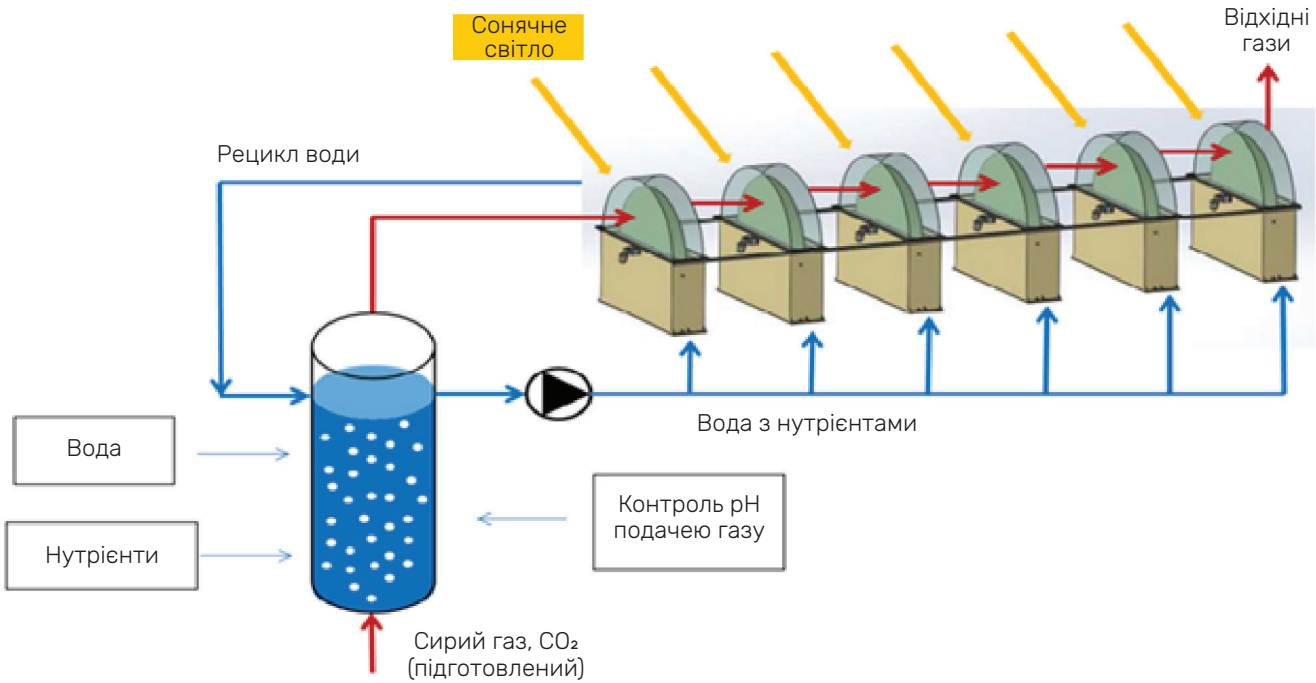


Рис. 7.6 - Принципова схема установки вирощування мікродоростей ALGADISK ⁹⁶

96 https://www.eubia.org/cms/wpcontent/uploads/2014/11/images_presentations_Presentation%20of%20Algadisk%20Technology.pdf

Оцінка потенціалу виробництва біометану в Україні з урахуванням мікродоростей, що можуть вирощуватися на дигестаті біогазових установок

РОЗДІЛ 8

Потенціал виробництва біогазу та біометану з мікродоростей оцінюється на основі концептуального підходу, за яким мікродорості вирощуються з використанням CO₂ від збагачення біогазу до біометану, а також частково поживних речовин із дигестату. При цьому наявність CO₂ від процесу збагачення біогазу розглядається як лімітуючий фактор.

З огляду на оцінений потенціал виробництва біометану в Україні на рівні 21,85 млрд нм³ CH₄/рік (UABIO, 2024), теоретичний потенціал утворення CO₂ від збагачення біогазу до біометану може становити 32,46 млн тCO₂/рік (табл. 8.1). Ця оцінка базується на середній концентрації CO₂ у біогазі 42,4%.

Таблиця 8.1 – Оцінений потенціал виробництва біометану з мікробактерій, вирощених із використанням CO₂ від збагачення біогазу

Параметр	Одиниця	Значення
Загальний потенціал виробництва біометану в Україні	млн нм ³ CH ₄ /рік	21,850.0
Потенціал утворення CO ₂ під час збагачення біогазу до біометану	млн нм ³ CO ₂ /рік	16,416.8
	млн тCO ₂ /рік	32.46
Теоретичне споживання CO ₂ для вирощування MB	т CO ₂ /тCP	1.8
Коефіцієнт засвоєння CO ₂	%	80.0%
Теоретичний потенціал вирощування MB	т CP/рік	14,424,882.4
Вміст CP у MB (для <i>Chlorella</i>)	% CP	94.6%
Прийнятий біохімічний потенціал метану з MB	нм ³ CH ₄ /тCP	320.0
Теоретичний потенціал виробництва CH ₄ з MB	млн нм ³ CH ₄ /рік	4,366.7
Економічний потенціал виробництва CH ₄ з MB	% від теоретичного потенціалу	15.4%
	млн нм ³ CH ₄ /рік	673.0

Використання потенціалу утворення CO₂ після збагачення всього обсягу біогазу за умови швидкості засвоєння CO₂ на рівні 80% дозволить культивувати близько 14,425 млн т сухої речовини мікробактерій (MB) на рік. Водночас теоретичний потенціал виробництва біометану оцінюється приблизно у 4,4 млрд нм³ CH₄/рік, виходячи з питомого виходу 320 нм³ CH₄/тCP MB. Слід зазначити, що прийнятий у цьому оцінюванні показник питомого виходу метану може вважатися певною мірою консервативним, оскільки за даними літератури він може сягати 370–400 нм³ CH₄/тCP MB. Наприклад, за лабораторними даними НТЦ Біомаса (2025), питомий вихід метану з *Chlorella* становить 320–420 нм³ CH₄/тCP MB за середньої концентрації CH₄ у біогазі на рівні 75%.

На практиці використання мікробактерій для виробництва біометану буде енергетично й економічно доцільним лише за умов

максимально можливого використання сонячної енергії та мінімізації споживання електро- і теплової енергії з інших джерел. Для оцінки економічного потенціалу прийнято, що в Україні такі умови можливі протягом не більше 41% року (150 днів). Враховуючи також, що культивування мікробактерій для біометану може бути реалізоване лише на 37,5% від загальних потужностей біогазових установок, економічний потенціал виробництва становить 673 млн нм³ CH₄/рік. При вищому питомому виході метану з мікробактерій на рівні 375 нм³CH₄/тCP, значення економічного потенціалу може зрости до 800 млн нм³CH₄/рік.

Регіональний розподіл потенціалу виробництва біометану з мікробактерій, вирощених із використанням CO₂ від збагачення біогазу, є пропорційним розподілу потенціалу виробництва біометану (рис. 8.1).

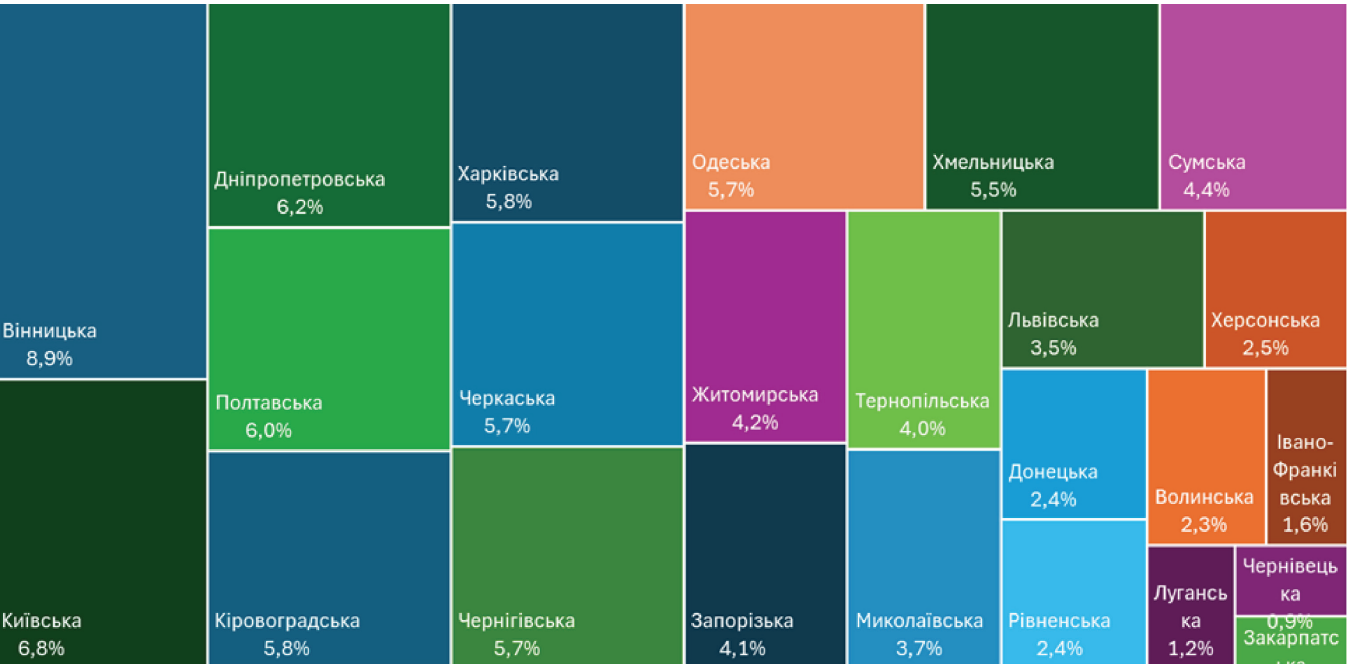


Рис. 8.1 – Регіональний розподіл потенціалу виробництва біометану з мікробактерій, вирощених із використанням CO₂ від збагачення біогазу

Висновки

З огляду на високу репродуктивну активність і значно вищий коефіцієнт перетворення сонячної енергії на органічну речовину, мікробактерії можуть стати вагомим джерелом біомаси для енергетики, зокрема для виробництва біометану.

Мікробактерії наразі здебільшого використовуються для отримання високоякісних продуктів в інших галузях через вищу рентабельність і обмежені стимули в енергетиці. У контексті біогазових установок їх культивування з використанням дигестату та CO₂ може: підвищити вихід біометану; покращити економіку процесу; знизити викиди CO₂.

Основним обмеженням для використання мікробактерій у виробництві енергії є висока собівартість та значні енерговитрати на їх культивування і концентрування. Основні шляхи зниження вартості: скорочення енерговитрат (крім сонячної енергії), мінімізація витрат на CO₂ і поживні речовини, застосування високопродуктивних фотобіореакторів.

Інтеграція культивування мікробактерій у біометанові проекти є технічно можливою альтернативою, якій сприяють такі фактори:

- наявність значних обсягів CO₂ від збагачення біогазу, що за відсутності попиту викидається в атмосферу;
- наявність дигестату з достатнім вмістом макро- та мікроелементів для росту водоростей;
- наявність тепла — від дигестату, когенераційних установок чи процесів збагачення.

Зазвичай ці побічні продукти й енергія мають низький попит і ціну, тож їх використання для вирощування мікробактерій можна вважати ефективним способом зменшення собівартості.

З технологічної точки зору, культивування мікробактерій на дигестаті та CO₂ є можливим, але використання дигестату обмежене через:

високий вміст деяких сполук, токсичних для росту,

високу мутність середовища, що створює «ефект затінення».

З огляду на низький вміст азоту в поширених промислових видах мікробактерій (*Chlorella* тощо) та високий коефіцієнт C:N, їх застосування для виробництва біогазу доцільне разом із рослинними рештками. Оскільки останні вимагають великої кількості вологи для методу вологого зброджування, використання суспензії мікробактерій із вмістом 0,5–3% сухої речовини є виправданим і дозволяє суттєво знизити витрати на їх концентрування.

Ключовими факторами економічної доцільності є собівартість вирощування мікробактерій і ціна реалізації біометану. Попередній аналіз показує, що для конкурентоздатності необхідно досягти:

застосування систем із продуктивністю щонайменше 3–5 г СР/л/добу,

культивування лише в період максимальної сонячної активності та високих температур,

собівартості не вище 0,2–0,25 €/т СР.

За нинішніх цін на біометан (90 €/МВт•год) досягнення такої вартості є доволі амбітною метою.

Економічний потенціал мікробактерій в умовах України, навіть за часткового використання підходу на біометанових заводах, становитиме не більше 1 млрд м³/рік, що, втім, є вагомим показником.

2025



UABIO

