

УДК 662.767.2.

МОЖЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПЕРЕДОВОГО БІОМЕТАНУ З МІКРОВОДОРОСТЕЙ, ВИРОЩЕНИХ НА ДИГЕСТАТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК. ЧАСТИНА 2.

Гелетука Г.Г.¹, докт. техн. наук, Гивель М.М.², магістр, Кучерук П.П.³ канд. техн. наук, Сидоренко М.Р.⁴, бакалавр

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, завідувач відділу, geletukha@uabio.org, <https://orcid.org/0000-0002-5249-3092>

²ТОВ "НТЦ "Біомаса" 03067, вулиця Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, консультант, hyvel@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-8740-714X>

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, kucheruk@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний інженер, sydorenko@secbiomass.com, <https://orcid.org/0009-0002-0006-6504>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.7>

Розглянуто особливості фізіологічних стратегій вирощування мікробіодоростей та проаналізовано оптимальні умови для вирощування мікробіодоростей. Розглянуто особливості роботи плоскостельних фотобіореакторів та проаналізовано залежність продуктивності вирощування мікробіодоростей від співвідношення освітленої площі поверхні фотобіореактора до об'єму культуральної рідини в ньому. Наведено попередні оцінки масового балансу основних компонентів для вирощування мікробіодоростей на дигестаті та оптимального співвідношення маси суспензії мікробіодоростей до маси соломи при їх сумісному анаеробному зброджуванні. Наведено попередню оцінку техніко-економічних показників вирощування мікробіодоростей у фотоавтотрофному режимі в плоскостельних фотобіореакторах, з використанням CO₂ від збагачення біогазу до біометану та рідкої фракції дигестату.

The features of the physiological strategies of growing microalgae are considered and the optimal conditions for growing microalgae are analyzed. The peculiarities of the operation of flat-panel photobioreactors were considered, and the dependence of microalgae growth productivity on the ratio of the illuminated surface area of the photobioreactor to the volume of the culture liquid in it was analyzed. Preliminary estimates of the mass balance of the main components for growing microalgae on digestate and the optimal ratio of the mass of the microalgae suspension to the mass of straw during their co-digestion are given. A preliminary evaluation of technical and economic indicators of growing microalgae in photoautotrophic mode in flat-panel photobioreactors, using CO₂ from biogas upgrading to biomethane and liquid digestate fraction, is given.

Бібл. 33, табл. 7, рис. 2.

Ключові слова: біогаз, передовий біометан, мікробіодорості, дигестат, біопалива третього покоління.

БГУ – біогазова установка;

МВ – мікробіодорості;

РФД – рідка фракція дигестату;

ТФД – тверда фракція дигестату;

СОР – сухі органічні речовини;

САРЕХ – капітальні витрати;

ОРЕХ – операційні витрати;

ФБР – фотобіореактор.

Актуальність роботи обумовлена метою ЄС та України щодо декарбонізації їх економік за рахунок використання відновлюваної енергії та низьковуглецевого палива. Сьогодні одним із найбільш економічно вигідних варіантів для цього є виробництво біометану. Існує потреба в інноваційному недорогому виробництві біометану з альтернативної високопродуктивної біомаси, яка може використовувати вихідну сировину з відходів. Водорості та ціанобактерії (далі – мікробіодорості) є такою перспективною біомасою, яка може використовувати багатий на поживні речовини дигестат та CO₂, як

побічний продукт збагачення біометану, для вирощування цінної біомаси, що використовується для виробництва передового біопалива (Директива ЄС RED II, Додаток 9). **Метою** роботи є продовження огляду, наведеного в частині 1 статті [1], більш повний аналіз технологій та обладнання для вирощування мікробіодоростей (МВ), попередня оцінка техніко-економічних показників технології вирощування мікробіодоростей на біогазових заводах з отриманням додаткового виходу біометану з використанням РФД. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Фізіологічні стратегії вирощування мікроводоростей: фотоавтотрофне, гетеротрофне та міксотрофне культивування

В залежності від джерела вуглецю і енергії можна виділити 3 способи культивування МВ: фотоавтотрофний, гетеротрофний та міксотрофний. Спосіб культивування МВ суттєво впливає на метаболізм та швидкість росту мікроводоростей і визначає якість біомаси МВ та загальну продуктивність процесу. Як і більшість наземних рослин, переважна більшість мікроводоростей

реалізують фотоавтотрофний тип живлення. У той же час, деякі види мікроводоростей здатні реалізовувати гетеротрофний, в якому використовуються органічні сполуки як джерело вуглецю та енергії, тому їм не потрібне світло. Види МВ, які проявляють одночасно властивості фотоавтотрофів та гетеротрофів, називають міксотрофами. Приріст біомаси МВ в фотоавтотрофному режимі відбувається за рахунок фіксації CO_2 в процесі фотосинтезу, тоді як в гетеротрофному – за рахунок реакцій катаболізму доступних органічних спо-

Таблиця 1. Порівняльна характеристика різних режимів культивування МВ на дигестаті біогазових установок з використанням CO_2 від збагачення біогазу

Table 1. Comparative characteristics of different cultivation modes of microalgae for cultivation in digestate of biogas plants using CO_2 from biogas upgrading

	Фотоавтотрофне	Гетеротрофне	Міксотрофне
Джерело вуглецю	Неорганічний вуглець (CO_2 , бікарбонати)	Органічний вуглець (глюкоза, фруктоза, ацетат, сахароза, інші)	Неорганічний і органічний вуглець
Джерело енергії	Світло	Органічні речовини (глюкоза, фруктоза, ацетати, сахароза, інші)	Світло і органічні речовини
Наявність світла	Обов'язкова	Не потребується, світло є інгібітором процесу	Потреба в освітленні нижча, ніж для фотоавтотрофного росту
Продуктивність культивування МВ	Низька (ефект самозатінення) <i>Chlorella sp.</i> 0,35-0,4 г/(л•добу) [4]	В 2,2 рази вище, ніж в фотоавтотрофному. Вищий рівень контролю за процесом вирощування. Високі концентрації біомаси, іноді понад 100 г/л [2, 3] <i>Chlorella sp.</i> 1,7-4 г/(л•добу) [4]	Висока: в 5-15 разів вище, ніж в фотоавтотрофному <i>Chlorella sp.</i> 3-5,18 г/(л•добу) [4]
Переваги	Дозволяє зменшити викиди парникових газів за рахунок споживання CO_2 від збагачення біогазу. Менший ризик контамінації процесу сторонніми мікроорганізмами, що містяться в дигестаті	Співвідношення поверхні до об'єму біореактора, на відміну від фотоавтотрофного режиму, не є лімітуючим фактором швидкості приросту біомаси МВ. Висока продуктивність і відсутність потреби у освітленні зменшують витрати на виробництво	Дозволяє зменшити викиди парникових газів за рахунок споживання CO_2 від збагачення біогазу. Потреба в освітленні нижча, ніж для фотоавтотрофного режиму
Недоліки	При використанні штучного освітлення збільшуються витрати на вирощування. Нижча продуктивність, ніж при гетеротрофному та міксотрофному культивуванні МВ. Співвідношення поверхні до об'єму біореактора буде одним з лімітуючих факторів швидкості приросту біомаси МВ	Не дозволяє зменшити викиди парникових газів за рахунок споживання CO_2 від збагачення біогазу. Високий ризик контамінації процесу сторонніми мікроорганізмами, що містяться в дигестаті.	Високий ризик контамінації процесу сторонніми мікроорганізмами, що містяться в дигестаті. Співвідношення поверхні до об'єму біореактора буде одним з лімітуючих факторів швидкості приросту біомаси МВ

лук, наприклад глюкози, фруктози, ацетатів та інших сполук.

Кожен з цих способів культивування має свої переваги та недоліки при їх застосуванні в технології вирощування МВ дигестаті біогазових установок з використанням CO_2 від збагачення біогазу (Таблиця 1).

Ключовою перевагою фотоавтотрофного та міксотрофного способів культивування є можливість перетворення CO_2 від збагачення біогазу в додатковий обсяг передового біометану. Однак, міксотрофний режим виглядає більш перспективним за рахунок вищої продуктивності та можливості споживання залишкових органічних речовин, що містяться в дигестаті (ацетати), на приріст біомаси МВ. Ацетат в процесі анаеробного зброджування є термінальним продуктом розпаду комплексної органічної речовини, з якого, шляхом ацетокластичного метаногенезу, утворюється близько 70% метану в біогазі. Вміст ацетату в дигестаті біогазових установок може складати до 3 г/л [2, 3] і буде залежати від умов реалізації процесу анаеробного зброджування.

Додаткові можливості у застосуванні міксотрофного способу культивування МВ можуть бути пов'язані із внесенням органічних речовин у складі субстратів, які одночасно можуть використовуватись при безпосередньому виробництві з них біогазу, наприклад, меляси, молочної сироватки, тощо. В роботах [7, 8, 9, 29] показано, що гній худоби, меляса, харчові відходи, стічні води та молочна сироватка після відповідної попередньої обробки, є органічними субстратами, перспективними для гетеротрофного та міксотрофного вирощування МВ.

Всі розглянуті у частині 1 статті [1] типи МВ (*Euglena gracilis*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella sp.*, *Scenedesmus*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Spirulina platensis*) мають здатність до міксотрофного культивування [5].

Оптимальні умови вирощування МВ

На ріст мікроводоростей в фотоавтотрофному та міксотрофному способі культивування впливають ряд факторів, зокрема: температура, рН, концентрація розчинених CO_2 та O_2 , солоність, інтенсивність освітлення та концентрація нутрієнтів в середовищі росту МВ [5]. Крім того, біохімічний склад біомаси МВ також залежить від їх виду, фази росту та від часу збору врожаю. Тому важливо враховувати безпосередній і комбінований вплив вищезгаданих факторів на швидкість росту та склад біомаси МВ.

Для забезпечення оптимального росту мікроводоростей потрібно створити відповідні умови культивування. Оптимальні та граничні умови вирощування та їх вплив на життєдіяльність МВ є індивідуальними для різних видів та штамів МВ. Разом з тим, для більшості видів МВ можна прийняти усереднені оптимальні умови культивування, як показано в таблиці 2.

Освітлення. На швидкість росту МВ впливають як інтенсивність, так і тривалість освітлення. Рекомендована інтенсивність освітлення складає 2000...4000 люкс [10]. При перевищенні рекомендованої інтенсивності освітлення відбувається фотоінгібування процесу фотосинтезу, в результаті чого дезактивуються білки у фотосинтетичних одиницях і, відповідно, знижується приріст біомаси МВ. Різні види мікроводоростей мають різну стійкість до фотоінгібування. Спектр поглинання світла мікроводоростями коливається в діапазоні від 400 до 700 нм, а їх фотосинтетичний апарат може сприймати максимальну інтенсивність світла (фотосинтетична активна радіація - ФАР) від 50 до 200 $\mu\text{моль фотон}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, залежно від виду [7].

Таблиця 2. Оптимальні умови росту мікроводоростей в фотоавтотрофному режимі [3-11]

Table 2. Optimal conditions for the growth of microalgae in the photoautotrophic mode [3-11]

Фактор	Оптимальні умови
Температура	20–30 °C
Інтенсивність освітлення	2000–4000 люкс
Тривалість освітлення	12:12 або 16:8 год (період світло-темрява)
Концентрація CO_2	2%–10%
Хімічна потреба в кисні (ХПК)	0,2-2 г/л
Час культивування	7-10 діб
Парціальний тиск, кПа	$\geq 0,1-0,2$
рН	7,0–9,0
CO_2/O_2	≈ 5
N/P (біодоступна форма)	≈ 16

Мікроводорості потребують відповідної тривалості освітлення, щоб максимізувати фотосинтетичну ефективність, ріст і продуктивність. Занадто мала або занадто велика тривалість освітлення може негативно вплинути на їх ріст і розвиток. Як правило, МВ найкраще ростуть за постійних циклів світло/темрява 12:12 або 16:8 годин [10].

Температура впливає як на розчинність вуглекислого газу в середовищі росту МВ, а відтак і його доступність для клітин МВ, так і на метаболічні процеси всередині клітин. Оптимальна температура для культивування мікроводоростей залежить від їх виду [11]. Для більшості видів оптимальна температура знаходиться в межах 20-30°C [12]. При таких температурах та атмосферному тиску розчинність CO_2 у воді становить 0,6-0,8 ммоль/л.

Величина рН. рН є одним з важливих факторів для росту мікроводоростей, оскільки він впливає на активність та синтез ферментів. Оптимальний діапазон рН для вирощування мікроводоростей також залежить від їх виду. Як правило, більшість мікроорганізмів живуть у діапазоні рН 7-9 [12].

CO_2 . Концентрація CO_2 в середовищі росту пропорційно впливає на швидкість його трансферу до клітин МВ, а відтак і швидкість їх росту. При цьому, для різних видів МВ існують оптимальні значення концентрації CO_2 , за яких темпи їх приросту залишаються найвищими. Підвищена концентрація CO_2 в середовищі створює стресові умови для клітин МВ, що призводить до збільшення частки ліпідів в біохімічному складі клітин, але при цьому значно знижується приріст

біомаси МВ. Найбільш стійкими до вуглекислого газу видами є *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.* та *Euglena gracilis*, а їхня максимальна продуктивність біомаси виявлена при концентраціях вуглекислого газу 10%, 10–20% та 5% відповідно [17].

Солоність впливає фізіологічні та біохімічні властивості МВ і загалом на їх ріст. При не оптимальній солоності пригнічується ріст МВ та споживання нітрогену з середовища їх росту [18]. В типовому середовищі для культивування мікроводоростей солоність складає від 0,5 до 3,5 г/л [19]. За толерантністю до солоності мікроводорості поділяють на три категорії: олігогалінові, коли вони можуть розвиватися лише у воді з низькою солоністю (солоність від 0,5 до 5 г/кг); мезогалінних, коли вони розвиваються в середовищі помірно солоної води (5-18 г/кг), і полігалінних, коли вони можуть розвиватися в сильно солоній воді (18-30 г/кг) [16].

Нутрієнти. Для росту мікроводоростей потрібні такі важливі компоненти як азот, фосфор і калій. Мікроелементи як правило вносять у вигляді сумішей враховуючи попередньо експериментально встановлену концентрацію кожного з мікроелементів для забезпечення активного росту МВ [20]. У таблиці 3 підсумовано основні компоненти, що входять до складу клітин мікроводоростей та їх функції в клітині.

Особливості плоскопанельних фотобіореакторів

Типовий фотобіореактор (ФБР) є трифазною системою, що включає рідку фазу (культуральне середовище), тверду фазу (клітини МВ), та газову фазу (CO_2 , O_2 , N_2). Світло іноді називають четвертою фазою. Розробка

Таблиця 3. Функції нутрієнтів при культивуванні МВ [20]

Table 3. Functions of nutrients in microalgae cultivation [20]

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

ефективного PBR вимагає розуміння взаємодії між параметрами середовища та біологічною реакцією [23].

Загальна базова конструкція плоскопанельних ФБР складається з двох паралельних пластин з тонким шаром суспензії мікродоростей між ними. Ефективна передача світла зазвичай досягається при товщині шару суспензії в кілька сантиметрів. Пластини ФБР, як правило, виготовляються з полівінілхлориду, полікарбонату, поліметилметакрилату, скла або поліетилену. Головною перевагою плоскопанельних ФБР є можливість досягнення високого співвідношення площі освітленої поверхні до об'єму культурального середовища.

Фотобіореактори з плоскими пластинами демонструють здатність для виробництва мікродоростей з продуктивністю від 5 до 15 г/(м²•добу), хоча і значення до 35 г/(м²•добу) було досягнуто при використанні стічної води як культурального середовища [5].

За допомогою плоских фотобіореакторів можливо досягти високої фотосинтетичної ефективності. Однак їм також притаманні деякі обмеження. Завдяки компактній конструкції можливі значні флуктуації температури та перегрів культури. Плоскі ФБР зазвичай охолоджуються шляхом оприскування поверхні водою, яку можна зібрати для подальшого повторного використання.

Для максимальної продуктивності мікродоростей зона світлового насичення повинна бути рівномірно розповсюджена по всьому об'єму ФБР, що загалом неможливо зробити в умовах масштабного культивування. Застосування перемішування забезпечує циркуляцію клітин водоростей між зонами, знижуючи ефект фотоінгібування на освітленій поверхні та втрату біомаси в зоні темряви [24].

У фотобіореакторах завжди існує градієнт освітленості, обумовлений поглинанням світла і взаємного затінення клітин. Світловий режим у реакторі визначається світловим градієнтом і швидкістю циркуляції рідини. У межах об'єму біореактора одночасно можна виділити кілька ділянок з різною інтенсивністю світла, а саме: повної темряви, світлового лімітування, світлового насичення, світлового інгібування. Зони повної темряви і фотоінгібування є несприятливими ділянками для росту водоростей. Інтенсивність падаючого світла, що завжди використовується як показник забезпечення світлом, мало характеризує справжні світлові умови у ФБР. Кращою характеристикою світлових умов у реакторі є середня інтенсивність світла. Концепція середньої інтенсивності світла базується на припущенні, що клітини мікродоростей при перемішуванні суспензії протягом короткотривалого часу перебувають у різних світлових умовах, що еквівалентно постійному перебуванню в умовах середньої інтенсивності світла.

Для створення сприятливих умов освітлення у ФБР потрібно максимально збільшити відношення освітлюваної поверхні ФБР до його об'єму (S/V). Співвідношення (S/V) є одним з найбільш важливих параметрів, які характеризують фотобіореактор. Залежність продуктивності біомаси від співвідношення V/S наведено на рис. 1 (V – в літрах, S – в м²).

Перехід від лабораторних установок до промислових, так зване масштабування, викликає великі труднощі. Для роботи великомасштабних ФБР рекомендується концентрація МВ вище 1,0 г/л. Концентрація МВ має великий вплив на економічність процесу та впливає на розмір реактора. Чим вища концентрація біомаси, тим менший необхідний об'єм реактора. Оптимальне співвідношення S/V визначається в діапазоні

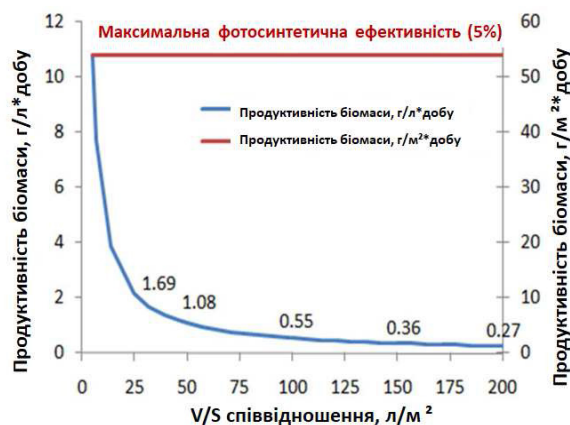


Рис. 1. Зміна продуктивності біомаси МВ при зміні співвідношення V/S для плоских фотобіореакторів [7]

Fig. 1. Change in microalgae biomass productivity with changing V/S ratio for flat photobioreactors [7]

43–73 м²/м³ для різних типів ФБР. Вищі значення співвідношення S/V можуть призвести до фотоінгібування та перегріву культури [23].

В таблицях 4 та 5 наведено результати розрахунку продуктивності вирощування біомаси МВ при різних розмірах установок культивування МВ та співвідношеннях V/S, на основі даних, приведених на рис. 1.

Згідно з вимірюваннями А. А. Циганкова (2001), при концентрації клітин *Anabaena variabilis* усього лише 0,6 г сухої біомаси/л суспензії шар культури товщиною 1 см поглинає 90% світлового потоку, і лише 1% світла досягає глибини 2 см. При більшій концентрації біомаси загасання світлового потоку відбувається ще швидше. Це добре видно з результатів вимірювання падіння щільності потоку фотонів при заглибленні в суспензію культури одноклітинної зеленої водорості *Euglena gracilis* [24]. Саме тому перші спроби використання для вирощування мікроводоростей звичайних ємностей зі значною (більше 5 см) товщиною шару суспензії призводили до дуже низьких виходів їх біомаси [24].

Для кожної культури існує оптимальна товщина плоскостанельного фотобіореактора, обумовлена компромісом між пригніченням глибинних шарів через нестачу світла і інгібуванням поверхневого шару культури світлом надмірної інтенсивності. У разі двобічного освітлення продуктивність культури зростає вдвічі.

Ризики біологічного обростання та зовнішнього забруднення можливо подолати або принаймні звести до мінімуму використанням одноразових реакторів з плоскими пластинами, що також суттєво знижує витрати на цей тип реактора. З цією метою був запатен-

тований реактор Green-Wall. Конструкція реактора складається з гнучкого прозорого поліетиленового пакета, який міститься між двома жорсткими залізними рамами, що обмежують відносно тонку вертикальну панель. Установка площею 400 м², що складається з 18 плоских реакторів 1,5 м³ була встановлена в Токопілла, Чилі, підключена до електростанції для використання димових газів як джерела вуглецю для виробництва мікроводоростей [33].

Попередня оцінка масового балансу CO₂ і нутрієнтів для вирощування мікроводоростей на дигестаті біогазових установок

Концепція вирощування МВ на дигестаті біогазових установок викладена в [1]. Оцінімо очікувані параметри і необхідну кількість CO₂ і поживних елементів (N, P, K) для вирощування МВ в автотрофному режимі в плоскопанельному ФБР з метою досягнення продуктивності вирощування 5 г/(л•добу).

Висока каламутність дигестату та високі концентрації аміаку, зумовлюють потребу в попередньому розведенні його водою або фільтрації. Для досягнення необхідної концентрації N, P, K та прозорості культурального середовища, концентрацію рідкого дигестату у воді потрібно забезпечувати на рівні 2-5% (2-5% - рідкого дигестату, 95-98% - чиста вода).

Враховуючи те, що CO₂ є в достатній кількості на біометанових заводах, а також те, що потребу в достатній кількості органічного вуглецю для гетеротрофного або міксотрофного способів культивування неможливо буде забезпечити при розведенні дигестату до 2-5% розчину з водою, передбачається, що буде реалізовуватись фо-

Таблиця 4. Продуктивність біомаси при граничних значеннях співвідношення площі до об'єму [23]

Table 4. Biomass productivity at limiting values of area-to-volume ratio [23]

S/V, м ² /м ³	V/S, л/м ²	Продуктивність, г/(л•добу)
43	23	2
73	13	6

Таблиця 5. Продуктивність фотобіореакторів різних розмірів

Table 5. Productivity of photobioreactors of different sizes

Фотобіореактор	Розмір, м	Об'єм, л	Площа, м ²	V/S, л/м ²	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 тис.	10 000	10	6
Вертикальний плоскостанельний, освітлення з обох сторін (h=0,01 м)	100×100×0,01	100 тис.	20 000	5	10

Таблиця 6. Вихідні дані та розрахунок балансу основних елементів для вирощування МВ на дигестаті біогазових установок

Table 6. Initial data and calculation of the balance of basic elements for growing microalgae in digestate of biogas plants

Показник	Одиниця виміру	Значення
Баланс вуглецю		
Потреба на 1 кг сух. вироблених мікроводоростей [20]	г CO ₂ /г МВ	1,8
Співвідношення C/CO ₂ = 12/44		0,27
Кількість вуглецю в 1,8 г CO ₂	г	0,49
Вміст вуглецю в мікроводоростях (30–50 % сухої маси)	г С/г сух. МВ	0,4
Ефективність засвоєння вуглецю CO ₂ мікроводоростями	%	81
Планова продуктивність МВ	г/(л•добу)	5
Планова подача CO ₂	г CO ₂ /(л•добу)	9
Планова подача С	г С/(л•добу)	9,00
Густина CO ₂ при 1 атм і 0 °С	г/л	1,977
Розчинність CO ₂ при атмосферному тиску і 20 °С	мл/100 мл Н ₂ О	87,70
Частка розчинного CO ₂ від максимально необхідного	%	19,3
Вміст гумінових кислот в РФД [22]	%	0,2
Вміст фульвокислот в РФД [22]	%	0,07
Вміст орг. вуглецю в дигестаті [22]	%	2
Кількість органічного вуглецю в рідкій фракції [22]	%	0,17
Кількість органічного С в рідкій фракції, що перейде в МВ	г С/л дигестату	1,39
Вміст азоту в РФД [22]	%	0,66
Вміст фосфору в РФД [22]	%	0,19
Вміст калію в РФД [22]	%	0,62
Частка органічного С в рідкій фракції від необхідного	%	15,4
Баланс азоту		
Потреба N на 1 кг сух. вироблених МВ [20]	г N/г сух. МВ	0,07
Вміст N в мікроводоростях (4–9 % сухої маси)	г N/г сух. МВ	0,06
Ефективність споживання азоту МВ, %	%	86
Планова продуктивність МВ	г/(л•добу)	5
Планова подача N	г N/(л•добу)	0,35
Кількість загального N в 1 л рідкої фракції дигестату	г N/ л РФД	6,6
Необхідний розчин дигестату з водою (по N)	%	5
Баланс фосфору		
Потреба Р на 1 кг сух. вироблених МВ [20]	г Р/г сух. МВ	0,01
Вміст Р в мікроводоростях (1–3 % сухої маси) [20]	г Р/г сух. МВ	0,01
Ефективність споживання фосфору МВ, %	%	100
Планова продуктивність МВ	г/(л•добу)	5
Планова подача Р	г Р/(л•добу)	0,05
Кількість загального Р в 1 л рідкої фракції дигестату	г Р/ л РФД	1,9
Необхідний розчин дигестату з водою (по Р)	%	2,6

Баланс калію		
Потреба К на 1 кг сух. вироблених МВ [20]	г К/г сух. МВ	0,015
Вміст К в міководоростях (1,1–2,4 % сухої маси) [20]	г К/г сух. МВ	0,015
Ефективність споживання калію МВ, %	%	100
Планова продуктивність МВ	г/(л•добу)	5
Планова подача К	г К/(л•добу)	0,075
Кількість загального К в 1 л рідкої фракції дигестату	г К/л РФД	6,2
Необхідний розчин дигестату з водою (по К)	%	1,2

тоавтотрофний спосіб культивування МВ. Штучне додавання субстратів з високим вмістом органічного вуглецю, як то глюкоза, в даній роботі не розглядається з економічних міркувань.

В таблиці 6 наведено результати оцінки потреби процесу фотоавтотрофного культивування МВ в основних елементах та узагальнений розрахунок балансу основних елементів для підготовки рідкої фракції дигестату для культивування МВ.

З наведених вище розрахунків можна зробити висновки наступні основні висновки:

- до 19% необхідного CO_2 можливо підвести через розчинення у культуральному середовищі, і до 81% - через барботування;
- 5% розчин рідкої фракції дигестату (95% чистої води) необхідний як субстрат для забезпечення необхідного надходження N для збору 5 г/(л•добу) міководоростей;
- 2,6% розчин рідкої фракції дигестату (97,4% чистої води) необхідний як субстрат для забезпечення необхідного запасу P для збору 5 г/(л•добу) міководоростей;
- 1,2% розчин рідкої фракції дигестату (98,8% чистої води) необхідний як субстрат для забезпечення необхідного запасу калію для збору 5 г/(л•добу) міководоростей.

Попередня техніко-економічна оцінка вирощування МВ

Виробництво продуктів на основі водоростей, як правило, складається з трьох основних етапів: 1) вирощування біомаси, 2) збір і зневоднення, 3) екстракція біомаси, фракціонування та перетворення. Вирощування біомаси водоростей відбувається у відкритих або закритих фотобіореакторах. З таких типів реакторів виходить досить розбавлений розчин МВ з концентрацією від 0,5-0,75 гСР/л для відкритих ставкових систем до 3-4 гСР/л – для закритих систем. Функція збирання та зневоднення полягає в тому, щоб збільшити концентрацію сухих речовин до 10-25% [29] або навіть

отримати повністю сухий продукт. Для технології виробництва біогазу з МВ етапи 2 та 3 не є обов'язковими, що дозволяє знизити собівартість отримання сировини для біогазу на основі МВ.

У собівартість вирощування МВ можуть входити витрати на електричну та теплову енергію, поживні речовини для росту МВ, витрати на оплату праці. Електрична енергія може споживатись на барботування сумішшю повітря з CO_2 , на перекачування та циркуляцію суспензії МВ в реакторних системах, а також на штучне освітлення. Витрати на теплову енергію можуть виникати для систем в помірному та холодному кліматах, де потрібно підтримувати стабільну температуру в реакторах вище 25°C.

Для запропонованої технології споживання електричної енергії буде пов'язане лише зі штучним освітленням та циркуляцією/перекачуванням суспензії МВ в реакторних системах. Передбачається, що подача CO_2 буде здійснюватись за рахунок тиску газу на виході з систем збагачення біогазу, відтак витрати на барботування сумішшю газів не виникатимуть. Забезпечення тепловою енергією передбачається за рахунок теплоти дигестату, що виходить з біогазових реакторів з температурою 38-42°C. Поживні речовини для МВ будуть подаватись у ФБР у складі самого дигестату. Отже, виробчині витрати на вирощування МВ за запропованою технологією включатимуть витрати на електричну енергію на штучне освітлення та циркуляцію/перекачування суспензії МВ, а також витрати на оплату праці персоналу.

За даними [24], експлуатаційні витрати та споживання енергії знаходяться в діапазоні 0,5-2 €/кгМВ і 0,2-5 кВт•год/кгМВ, для несконцентрованих розчинів МВ і відкритих систем культивування, відповідно. За даними [30], собівартість виробництва біомаси МВ у відкритих ставках площею 5000 акрів становить від 1,35 до 1,8 \$/кгМВ. Для закритих систем експлуатаційні витрати зменшуються до 0,1-0,6 €/кгМВ, а споживання енергії – до 0,1-0,7 кВт•год/кгМВ [24].

З точки зору економічної доцільності вирощування МВ важливим фактором є також ціна на МВ як сировину для виробництва кінцевого продукту. Така ціна залежить від галузі виробництва, собівартості і кінцевого продукту. Як видно з рис. 2, на ринках з високою ціною на МВ існує менший попит, що не дозволяє масштабувати масове виробництво МВ. Найбільшим перспективним ринком МВ як сировини є енергетика. При цьому, з МВ можна виробляти як рідкі біопалива, як правило біодизель, так і газоподібні бопалива, як то біогаз. За даними Міністерства енергетики США [24], ціна на МВ на рівні 0,49 \$/кг може забезпечити економічно ефективне виробництво рідкого біопалива з них. Поточний стан та перспективи виробництва дизельного біопалива у світі та в Україні, огляд технологій трансформації зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах представлені у статтях [25,26,27, 28].

За нашими попередніми оцінками, для плоскочасельного ФБР об'ємом 100 тис. л і продуктивністю 5 г МВ/(л•добу) орієнтовні витрати та вихід продуктів будуть наступними:

Освітлення: $0,5 \text{ Вт/л} \times 100 \text{ тис. л} = 50 \text{ тис. Вт} = 50 \text{ кВт} \rightarrow$

$\rightarrow 50 \text{ кВт} \times 12 \text{ год/добу} = 600 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу} \rightarrow$

$\rightarrow 600 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу} \times 0,05 \text{ $/кВт} \cdot \text{год} = 30 \text{ $/добу};$

Біомаса: $5 \text{ г/(л} \cdot \text{добу)} \times 100 \text{ тис. л} = 0,5 \text{ млн г/добу} = 500 \text{ кг/добу} \rightarrow$

$\rightarrow 500 \text{ кг/добу} \times 0,2 \text{ $/кг} = 100 \text{ $/добу};$

Біометан: з 0,5 т/добу МВ можна отримати 155 м^3 /добу біометану $\rightarrow$

$\rightarrow 155 \text{ м}^3 \text{ /добу біометану} \times 9,3 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^3 = 1442 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}.$

При ціні біометану 900 \$/1000 м^3 , дохід від біометану отриманого з біомаси мікробіодоростей складе 140 \$/добу і можна очікувати позитивних економічних показників такої технології. Щоб досягти реального виробництва сучасного біометану з водоростей, цільові

експлуатаційні витрати на вирощування МВ мають становити менше 0,2 євро/кгМВ.

Детальне ТЕО технології буде виконане після підтвердження лабораторним шляхом основних технологічних параметрів процесу.

Анаеробне зброджування мікробіодоростей як ко субстрату з іншими типами сировини

Біомаса МВ, в залежності від їх виду та умов росту, буде містити різні пропорції макросполук (білків, жирів та вуглеводів), що можуть бути перетворені в додатковий біогаз та, в подальшому, в біометан. При цьому, використання суспензії з вирощеними МВ для виробництва біогазу не потребуватиме обов'язкового концентрування біомаси МВ (відділення МВ від рідини), позаяк волога, що міститься в суспензії, може бути необхідним компонентом у технології анаеробного зброджування поживних решток. Відомо також, що співвідношення С:N в складі органічної речовини МВ є меншим 10, що не є оптимальним для анаеробного зброджування, але дозволить збалансовувати таке співвідношення у поєднанні з поживними рештками з С:N 50-100 до рекомендованого діапазону значень С/N = 15-30.

Так, наприклад, при змішуванні 1 т соломи (СР = 80%, С = 35%, N = 0,5%), що міститиме 200 кг вологи, 800 кг СР, з них 4 кг N, з 8 т суспензії мікробіодоростей, вирощених на дигестаті (СР = 1%, С = 45%, N = 0,15%), що міститиме 7 920 води, 80 кг СР, з них 12 кг N, можна отримати 9 т субстрату з прийнятною для подачі в анаеробний біореактор вологістю 90,3% та співвідношенням С/N на рівні 20, що знаходиться в межах рекомендованого діапазону (Табл. 7).

Висновки

Мікробіодорості мають ряд потенційних переваг для застосування їх у виробництві біопалив, але є загальною потребою у розробці та перевірці в промислових умовах технології вирощування МВ на дигестаті врахо-

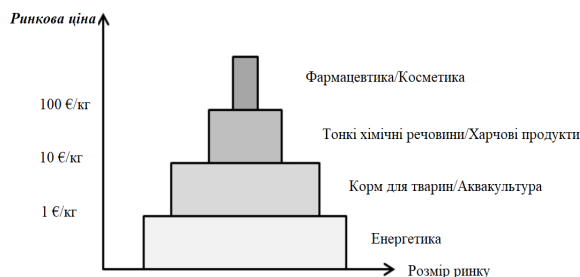


Рис. 2. Ринки та ціни мікробіодоростей як сировини для виробництва [6]

Fig. 2. Markets and prices of microalgae as raw materials for production [6]

Таблиця 7. Параметри суміші суспензії МВ, вирощених на дигестаті, та соломою

Table 7. Parameters of the mixture of suspension of microalgae grown in digestate and straw

Параметр	Значення для:		
	Соломи	Суспензії мікроводоростей, вирощених на дигестаті	Суміші
СР, %	80	1	9,8
C/N	70	3,0	19,8

вуючи ряд особливостей та ризиків. В результаті аналізу існуючого досвіду, для отримання найвищого приросту біомасу, перспективним є застосування плоскопанельного фотобіореактора. З метою забезпечення оптимальних умов культивування, зменшення каламутності та концентрації аміаку, рідку фракцію доцільно розвести водою у співвідношенні 2-5% РФД та 95-98% води відповідно до розрахованого балансу компонентів. Спільне зброджування мікроводоростей ($C/N < 10$) з поживними рештками (для соломи $C/N > 70$) дозволяє отримати оптимальний субстрат для бродіння ($C/N = 15-30$). Це також зменшує потребу в концентрації мікроводоростей.

При ціні біометану 900 \$/1000 м³ і собівартості МВ менше 0,2 євро/кг, виробництво біометану може стати рентабельним. Найвищу продуктивність біомаси та найнижчі операційні затрати демонструють саме закриті системи плоскопанельних фотобіореакторів і застосовуючи його є реальним досягти мінімальних затрат на виробництво біомаси МВ. Враховуючи очікуване зростання кількості біометанових заводів в Україні, технології вирощування МВ на дигестаті БГУ мають всі передумови для масштабування на національному рівні і дозволять збільшити потенціал виробництва біометану та зменшити викиди ПГ.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гелетука Г.Г., Гивель М.М., Кучерук П.П. Можливості виробництва передового біометану з мікроводоростей, вирощених на дигестаті біогазових установок. Частина 1. Теплофізика та теплоенергетика. 2024.
2. Zuliani, Luca & Frison, Nicola & Jelic, Aleksandra & Fatone, Francesco & Bolzonella, David & Ballottari, Matteo. Microalgae Cultivation on Anaerobic Digestate of Municipal Wastewater, Sewage Sludge and Agro-Waste. International Journal of Molecular Sciences. 17.2016.1692. 10.3390/ijms17101692.

3. Moeller, Lucie & Zehnsdorf, Andreas. Process upsets in a full-scale anaerobic digestion bioreactor: over-acidification and foam formation during biogas production. Energy, Sustainability and Society. 6.2016. 10.1186/s13705-016-0095-7.

4. Hyun-Sik Yun, Young-Saeng Kim, Ho-Sung Yoon. Effect of Different Cultivation Modes (Photoautotrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic) on the Growth of Chlorella sp. and Biocompositions. Sec. Bioprocess Engineering Volume 9 - 2021 | <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.774143>

5. Octavio Perez-Garcia, Y. Bashan. Microalgal Heterotrophic and Mixotrophic Culturing for Bio-refining: From Metabolic Routes to Techno-economics. Environmental Science, Engineering, Business.2015. https://www.researchgate.net/publication/283489490_Microalgal_Heterotrophic_and_Mixotrophic_Culturing_for_Bio-refining_From_Metabolic_Routes_to_Techno-economics

6. Claudio Fuentes-Grünwald, José Ignacio Gayo-Peláez, Vanessa Ndovela, Eleanor Wood I, Rahul Vijay Kapoore, Carole Anne Llewellyn. Towards a circular economy: A novel microalgal two-step growth approach to treat excess nutrients from digestate and to produce biomass for animal feed. Bioresource Technology 320 (2021) 124349.

7. Tylor J. Johnson, Sarmila Katuwal, Gary A. Anderson, Liping Gu, Ruanbao Zhou, William R. Gibbons. Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. Biotechnology Progress. Vol.34(4). 2018. https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria

8. Giorgos Markou, Liang Wang, Jianfeng Ye, Adrian Unc. Using agro-industrial wastes for the cultivation of microalgae and duckweeds: Contamination risks and biomass safety concerns. Biotechnol Adv. 2018 Apr 17;36(4):1238–1254. doi: 10.1016/j.biotechadv. 2018.04.003

9. Kashif Rasool, Sabir Hussain, Asif Shahzad, Waheed Miran, Khaled A. Mahmoud, Nisar Ali, Fares Almomani. Comprehensive insights into sustainable conversion of agricultural and food waste into microbial protein for animal feed production. Rev Environ Sci Biotechnol (2023) 22:527–562. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09651-6>

10. Jerry D Murphy, Bernhard Drosch, Eoin 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
11. Monique Ras, Jean-Philippe Steyer, Olivier Bernard. Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. Reviews in Environmental Science and Bio/technology, 2013, 12 (2), pp. 153-164. <https://inria.hal.science/hal-00852286/document>
12. Kumar Gaurav, Krishna Neeti, Reena Singh. Microalgae-based biodiesel production and its challenges and future opportunities: A review. Green Technologies and Sustainability. Vo.2, Issue 1, January 2024, 100060. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736123000532?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8b9cb2cdd8377bc
13. Tylor J. Johnson, Sarmila Katuwal, Gary A. Anderson, Liping Gu, Ruanbao Zhou, William R. Gibbons. Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. Biotechnology Progress. Vol.34(4). 2018. https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria
14. 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>
15. Álvaro Torres, Fernando G. Feroso, Bárbara Rincón, Jan Bartacek, Rafael Borja and David Jeison. Challenges for Cost-Effective Microalgae Anaerobic Digestion. Biodegradation - Engineering and Technology. 2013. <https://www.intechopen.com/chapters/45072>
16. Kamrul Hasan Chowdury, Nurun Nahar, Ujjwal Kumar Deb. The Growth Factors Involved in Microalgae Cultivation for Biofuel Production: A Review. Computational Water, Energy, and Environmental Engineering. Vol.9 No.4, October 2020. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=103862>
17. C. Kandasamy, Marcos A , Mikihide Demura, Nakajima. 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>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2267>
18. Mohseni, A., Fan, L., & Roddick, F. A. (2021). Impact of microalgae species and solution salinity on algal treatment of wastewater reverse osmosis concentrate. Chemosphere, 285, 131487. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131487
19. Styliani E. Biliari, Ioannis D. Manariotis. (2021) Sodium chloride and nitrogen effects on Chlorella vulgaris growth and biocommodities production. Desalination and Water Treatment, 237, doi:10.5004/dwt
20. 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/femsle/article/365/3/fnx262/4705896?searchresult=1>
21. Biomethane Industrial Partnership. Task Force 5. Innovative technologies for biomethane production. 2023. https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2023/12/BIP_Task-Force-5_Innovative-technologies_Dec2023.pdf
22. Богдан Малиновський. Як у біогазових установках добриво виробляють. Головний журнал з питань агробізнесу. 2020. <https://propozitsiya.com/ua/yak-u-biogazovyh-ustanovkah-dobryvo-vyroblyayut>
23. Clemens Posten. Design principles of photobioreactors for cultivation of microalgae. Engineering in Life Sciences. Vol 9. Issue 3. 2009. <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/journal/16182863>
24. F. Fasaei, J.H. Bitter, P.M. Slegers, A.J.B. van Boxtel. Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. Volume 31, April 2018, Pages 347-362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926417306677>
25. Драгнев С.В., Железна Т.А. Аналіз сировинної та технологічної бази для виробництва дизельного біопалива в Україні // Теплофізика та Теплоенергетика, – 2024, т. 46 № 3, с. 103-112. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.11>, <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/599/521>
26. Железна Т.А., Драгнев С.В. Роль рідких біопалив у декарбонізації транспортного сектору // Теплофізика та теплоенергетика. – 2024, т. 46, № 4, с. 82-90. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.9>
27. Железна Т.А., Драгнев С.В. Аналіз напрямків оптимізації логістики постачання біопалив на енергетичні об'єкти. Теплофізика та теплоенергетика. 2024, т. 46, № 1, с. 66-75. <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/571>
28. Траклер І.С., Потанова М.В. Огляд технологій трансформації зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах України та Європи // Теплофізика та теплоенергетика. – 2024, т. 46, № 4, с. 91-100. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10>

29. *A.I. Barros, et al.* Harvesting techniques applied to microalgae: a review *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 41 (2015), pp. 1489-1500.
30. *U.S. Department of Energy.* Bioenergy Technologies Office Multi-Year Program Plan. Washington D.C, 2016 http://energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/mypp_beto_march2016_2.pdf
31. *Золотарьова О.К., Шнюкова Є.І., Сиваш О.О., Михайленко Н.Ф.* Перспективи використання мікро-водоростей у біотехнології. К. Альтерпрес. 2008. 234с. https://www.botany.kiev.ua/doc/zolot_monog_2008.pdf
32. *Lieve M. L. Laurens.* State of Technology Review–Algae Bioenergy. An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project. 2017. IEA Bioenergy Task 39. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-Final-template-20170131.pdf>
33. *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

OPPORTUNITIES OF ADVANCED BIOMETHANE PRODUCTION FROM MICROALGAE GROWN ON BIOGAS PLANT DIGESTATE. Part 2.

Geletukha H.G.¹, Hyvel M.M.², Kucheruk P.P.³
Sydorenko M.R.⁴

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist Str., Kyiv, 03057

LLC"SEC"Biomass"03067, street Maria Kapnist, 2A, Kyiv, 03057, Ukraine

¹*Dr. of science, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057 geletukha@uabio.org, <https://orcid.org/0000-0002-5249-3092>*

²*Master's degree, LLC"SEC"Biomass"03067, street Maria Kapnist, 2A, Kyiv, 03057, Ukraine, consultant, hyvel@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-8740-714X>*

³*PhD Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist Str., Kyiv, 03057, senior researcher, kucheruk@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>*

⁴*Bachelor's degree, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist Str., Kyiv, 03057, leading engineer, sydorenko@secbiomass.com, <https://orcid.org/0009-0002-0006-6504>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.7>

The aim of the work is to continue the review given in part 1 of the article and to provide a more complete analysis of technologies and equipment for growing microalgae (MA), technical and economic indicators of the technology of cultivating microalgae in biogas plants with additional biomethane yield and utilization of the liquid fraction of digestate.

The design features of flat-panel photobioreactors and their influence on the productivity of growing MA are considered. It is shown that to achieve the productivity of growing MA at the level of 5 g/(L·day) the ratio of the volume of the photobioreactor to its area should not exceed 10-12 L/m². The physiological strategies for cultivating MA are considered and it is shown that their cultivation at biomethane plants, using CO₂ from biogas upgrading and the liquid fraction of digestate, is appropriate in photoautotrophic and, partially, mixotrophic modes. Based on a literature review, the optimal conditions for growing microalgae

in a photoautotrophic mode are shown. A preliminary assessment of the mass balance of CO₂ and nutrients for growing microalgae on the digestate of biogas plants is performed. It is shown that to ensure the productivity of MA cultivation at the level of 5 g/(L·day), the liquid fraction of the digestate of a typical composition will be advisable to dilute with water in a ratio of 2-5% digestate and 95-98% water. This will ensure a sufficient amount of nutrients in the MA growth medium, as well as minimize the impact of turbidity and high ammonia concentrations what are present in the digestate.

The work provides an estimate of the required mass ratio of the MA and straw, at which the optimal C/N ratio for anaerobic fermentation is achieved at 19.8 and the dry matter content in the input mixture of substrates at 9.8%. When mixing MA with straw for further production of biogas from them, there is no need to concentrate microalgae.

Data on the cost of microalgae grown in open and closed systems are presented, as well as possible markets for MA and prices for MA in these markets. It is shown that closed types of photobioreactors should allow for a lower MA production cost and have lower energy requirements. A preliminary estimate of MA production cost in a flat-panel photobioreactor with a volume of 100 thousand L and a productivity of 5 g/(L·day) is presented. It is shown that with an estimated cost of MA cultivation of 0.26 \$/kg and a price for biomethane from MA of 900 \$/1000 m³, a positive economic effect can be expected with a profitability of 0.02 \$/kg MA. However, for the cost-effective production of advanced biomethane from microalgae, the cost of their cultivation should be less than 0.2 euros/kg of dry matter of MA.

Considering the expected increase in the number of biomethane plants in Ukraine due to the opening of exports to EU countries, the technology of growing microalgae on the digestate of biogas plants has all the prerequisites for scaling up at the national level, which will allow increasing the potential for biomethane production and reducing greenhouse gas emissions.

References 33, tables 7, figures 2.

Key words: biogas, advanced biomethane, microalgae, digestate purification, production of third generation biofuels.

1. Geletukha G.G., Hyvel M.M., Kucheruk P.P. Opportunities of advanced biomethane production from microalgae grown on biogas plant digestate. Part 1. Thermal physics and thermal energy. 2024.

2. *Zuliani, Luca & Frison, Nicola & Jelic, Aleksandra & Fatone, Francesco & Bolzonella, David & Ballottari, Matteo.* Microalgae Cultivation on Anaerobic Digestate of Municipal Wastewater, Sewage Sludge and Agro-Waste. *International Journal of Molecular Sciences.* 17.2016.1692. 10.3390/ijms17101692.
3. *Moeller, Lucie & Zehnsdorf, Andreas.* Process upsets in a full-scale anaerobic digestion bioreactor: over-acidification and foam formation during biogas production. *Energy, Sustainability and Society.* 6.2016. 10.1186/s13705-016-0095-7.
4. *Hyun-Sik Yun, Young-Saeng Kim, Ho-Sung Yoon.* Effect of Different Cultivation Modes (Photoautotrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic) on the Growth of *Chlorella* sp. and Biocompositions. *Sec. Bioprocess Engineering Volume 9 - 2021* | <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.774143>
5. *Octavio Perez-Garcia, Y. Bashan.* Microalgal Heterotrophic and Mixotrophic Culturing for Bio-refining: From Metabolic Routes to Techno-economics. *Environmental Science, Engineering, Business.*2015. https://www.researchgate.net/publication/283489490_Microalgal_Heterotrophic_and_Mixotrophic_Culturing_for_Bio-refining_From_Metabolic_Routes_to_Techno-economics
6. *Claudio Fuentes-Grünwald, José Ignacio Gayo-Peláez, Vanessa Ndovala, Eleanor Wood I, Rahul Vijay Kapoor, Carole Anne Llewellyn.* Towards a circular economy: A novel microalgal two-step growth approach to treat excess nutrients from digestate and to produce biomass for animal feed. *Bioresource Technology* 320 (2021) 124349.
7. *Tylor J. Johnson, Sarmila Katuwal, Gary A. Anderson, Liping Gu, Ruanbao Zhou, William R. Gibbons.* Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. *Biotechnology Progress.*Vol.34(4). 2018. https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria
8. *Giorgos Markou, Liang Wang, Jianfeng Ye, Adrian Unc.* Using agro-industrial wastes for the cultivation of microalgae and duckweeds: Contamination risks and biomass safety concerns. *Biotechnol Adv.* 2018 Apr 17;36(4):1238–1254. doi: 10.1016/j.biotechadv. 2018.04.003
9. *Kashif Rasool, Sabir Hussain, Asif Shahzad, Waheed Miran, Khaled A. Mahmoud, Nisar Ali, Fares Almomani.* Comprehensive insights into sustainable conversion of agricultural and food waste into microbial protein for animal feed production. *Rev Environ Sci Biotechnol* (2023) 22:527–562. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09651-6>
10. *Jerry D Murphy, Bernhard Drosch, Eoin 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
11. *Monique Ras, Jean-Philippe Steyer, Olivier Bernard.* Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology,* 2013, 12 (2), pp. 153-164. <https://inria.hal.science/hal-00852286/document>
12. *Kumar Gaurav, Krishna Neeti, Reena Singh.* Microalgae-based biodiesel production and its challenges and future opportunities: A review. *Green Technologies and Sustainability.*Vo.2, Issue 1, January 2024, 100060. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736123000532?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8b9cb2cddde8377bc
13. *Tylor J. Johnson, Sarmila Katuwal, Gary A. Anderson, Liping Gu, Ruanbao Zhou, William R. Gibbons.* Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. *Biotechnology Progress.*Vol.34(4). 2018. https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria
14. *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>
15. *Álvaro Torres, Fernando G. Fermoso, Bárbara Rincón, Jan Bartacek, Rafael Borja and David Jeison.* Challenges for Cost-Effective Microalgae Anaerobic Digestion. *Biodegradation - Engineering and Technology.* 2013. <https://www.intechopen.com/chapters/45072>
16. *Kamrul Hasan Chowdury, Nurun Nahar, Ujjwal Kumar Deb.* The Growth Factors Involved in Microalgae Cultivation for Biofuel Production: A Review. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering.*Vol.9 No.4, October 2020. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=103862>
17. *C. Kandasamy, Marcos A , Mikihide Demura, Nakajima.* 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>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2267>
18. *Mohseni, A., Fan, L., & Roddick, F.A.* (2021). Impact of microalgae species and solution salinity on algal treatment of wastewater reverse osmosis concentrate. *Chemosphere,* 285, 131487. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.13148

19. *Styliani E. Biliani, Ioannis D. Manariotis.* (2021) Sodium chloride and nitrogen effects on *Chlorella vulgaris* growth and biocommodities production. *Desalination and Water Treatment*, 237, doi:10.5004/dwt
20. *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/femsle/article/365/3/fnx262/4705896?searchresult=1>
21. *Biomethane Industrial Partnership.* Task Force 5. Innovative technologies for biomethane production. 2023. https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2023/12/BIP_Task-Force-5_Innovative-technologies_Dec2023.pdf
22. *Bohdan Malinovskyi.* Yak y biogazovuh ustanovkax dobrovo vurobliut.[How fertilizer is produced in biogas plants].The main magazine on agribusiness issues 2020. <https://propozitsiya.com/ua/yak-u-biogazovyh-ustanovkah-dobryvo-vyroblayut>
23. *Clemens Posten.* Design principles of photobioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences*. Vol 9. Issue3.2009. <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/journal/16182863>
24. *F.Fasaei, J.H. Bitter, P.M. Slegers, A.J.B. van Boxtel.* Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. Volume 31, April 2018, Pages 347-362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926417306677>
25. *Dragnev S.V., Zhelezna T.A.* Analiz surovunnoi ta technologichnoi bazu dlia vurobnutstva dizelnogo biopaluvu v Ukraini [Analysis of the raw material and technological base for the production of diesel biofuel in Ukraine] // *Thermal Physics and Thermal Power Engineering*, – 2024, vol. 46, No. 3, pp. 103-112. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.11>, <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/599/521>
26. *Zhelezna T.A., Dragnev S.V.* Rol ridkuh biopaluv y decarbonizacii transportnogo sektory. [The role of liquid biofuels in the decarbonization of the transport sector] // *Thermal Physics and Thermal Power Engineering*. – 2024, vol. 46, No. 4, pp. 82-90. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.9>
27. *Zhelezna T.A., Dragnev S.V.* Analys napryamkiv optimizacii logistiku postachannia biopaluv na energetichni obektu. [Analysis of directions for optimizing the logistics of biofuel supply to energy facilities]. *Thermal Physics and Heat Power Engineering*. 2024, vol. 46, no. 1, p. 66- 75. <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/571>
28. *Traksler I.S., Potapova M.V.* Oglyad technology transformacii zelenogo vodnyu dlya pidvuschennya vurobnuctva biometany na diyuchuh zavodah Ukrainu ta Europy. [Review of green hydrogen transformation technologies to increase biomethane production at operating plants in Ukraine and Europe] // *Thermal Physics and Thermal Power Engineering*. – 2024, vol. 46, No. 4, pp. 91-100. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.10>
29. *A.I. Barros, et al.* Harvesting techniques applied to microalgae: a review *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 41 (2015), pp. 1489-1500.
30. *U.S. Department of Energy.* Bioenergy Technologies Office Multi-Year Program Plan. Washington D.C, 2016 http://energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/mypp_beto_march2016_2.pdf
31. *Zolotaryova O.K., Shnyukova E.I., Sivash O.O., Mykhaylenko N.F.* Perspektyvy vukoristannya microvodorotey y biotechnologii. [Prospects for the use of microalgae in biotechnology] B. Alterpress. 2008. 234p. https://www.botany.kiev.ua/doc/zolot_monog_2008.pdf
32. *Lieve M. L. Laurens.* State of Technology Review–Algae Bioenergy. An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project. 2017.IEA Bioenergy Task 39. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-Final-template-20170131.pdf>
33. *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

Отримано 11.12.2025

Received 11.12.2025

Прийнято до друку 18.02.2025
Accepted for publication 18.02.2025