

УДК 662.767.2.

МОЖЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПЕРЕДОВОГО БІОМЕТАНУ З МІКРОВОДОРОСТЕЙ, ВИРОЩЕНИХ НА ДИГЕСТАТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК. ЧАСТИНА 1.

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

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

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>

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7>

Наведено результати аналізу та огляду сучасних технологій, видів мікроводоростей та обладнання для їхнього вирощування на рідкій фракції дигестату біогазових станцій. Представлено поточний стан з виробництва біогазу/біометану в Україні та використання рідкої фракції дигестату. Проаналізовано хімічний склад дигестату та методи підготовки його до культивування мікроводоростей. Запропоновано схему імплементації технології культивування мікроводоростей на біогазовому/біометановому заводі.

The results of the analysis and review of state-of-art technologies, species and equipment for growing microalgae in the liquid fraction of the digestate of biogas plants were presented. The current state of production of biogas/biomethane in Ukraine and the use of the liquid fraction of digestate was presented. The chemical composition of the digestate and the methods of its preparation for the cultivation of microalgae were considered and representative. An implementation scheme of microalgae cultivation technology at the biogas/biomethane plant was developed and suggested.

Бібл. 33, табл. 4, рис. 1.

Ключові слова: біогаз, передовий біометан, мікроводорості, очищення дигестату, виробництво біопалива третього покоління.

БГУ – біогазова установка;

КС – клітинна стінка;

МВ – мікроводорості;

РФД – рідка фракція дигестату;

ТФД – тверда фракція дигестату;

AD – анаеробне зброджування;

COP – сухі органічні речовини;

CAPEX – капітальні витрати;

OPEX – операційні витрати;

PBR – фотобіореактор.

Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю пошуку сталих та ефективних рішень на шляху збільшення виробництва відновлюваної енергії та декарбонізації економіки в Україні.

Використання відновлюваних джерел енергії є одним із найбільш важливих напрямів енергетичної політики України, спрямованої на заощадження традиційних паливно-енергетичних ресурсів, поліпшення стану навколишнього природного середовища, запобігання зміні клімату. Збільшення частки відновлюваних джерел в енергетичному балансі України сприятиме процесу декарбонізації економіки, необхідному для виконання міжнародних зобов'язань країни щодо скорочення викидів парникових газів та сприятиме змен-

шенню наслідків запровадження Євросоюзом прикордонного вуглецевого податку (Carbon Border Adjustment Mechanism; CBAM) [1].

На сьогоднішній день, одним із найбільш перспективних напрямків відновлюваної енергетики є виробництво біогазу та біометану. Основними перевагами даного напрямку є широкий спектр видів сировини для виробництва біогазу/біометану та мультиваріантність їх використання – від комбінованого виробництва електричної та теплової енергії до виробництва рідких біопалив та зеленого водню. Разом з тим, існує певна межа в можливості використання ресурсів біомаси, і передусім – ресурсів сталої біомаси для виробництва передових біопалив та біогазу [2].

Відтак, існує потреба в пошуку видів сировини для біогазу, виробництво яких буде сталим, екологічно безпечним та відносно дешевим. Такою сировиною можуть стати мікроводорості, вирощені на побічному продукті виробництва біогазу – дигестаті, з використанням CO_2 , що міститься в біогазі. Біогаз та біометан, вироблений з мікроводоростей, відносяться до біопалив 3-го покоління. Мікроводорості є також серед переліку видів сировини для виробництва передових біопалив та біогазу в Директиві ЄС RED II (додаток 9), що дозволяє зараховувати подвійний облік енергії у виконанні зобов'язань зі скорочення використання викопних видів палив.

Метою роботи є огляд технологій та аналіз можливості впровадження технологій культивування мікроводоростей на біогазових/біометанових заводах, з отриманням додаткового виходу біогазу/біометану та корисним використанням дигестату.

Методи дослідження включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Вступ

Промислове виробництво біогазу в Україні почалось фактично з 2003 року, з появою першого комерційного проекту біогазової станції з КГУ на 160 кВтел на свинофермі компанії Агро-Овен в с. Оленівка, Дніпропетровської області. Сьогодні в Україні працює 83 біогазові установки [3], включаючи 33 установки дегазації полігонів та звалищ ТПВ, і їх кількість продовжує зростати. В поточному 2024 році уведено в експлуатацію перші проекти виробництва біометану в Україні, і очікується, що десятки нових установок будуть збудовані в близькій перспективі.

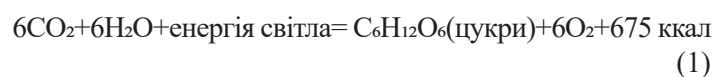
Потенціал виробництва біометану в Україні, враховуючи наявність найбільшої площі ріллі у Європі і, відповідно, значних обсягів побічної продукції та відходів сільськогосподарського походження, є одним з найвищих у світі. За оцінкою Біоенергетичної асоціації України, такий потенціал оцінюється в 21,18 млрд m^3CH_4 /рік [4], що складає близько 80% усього споживання природного газу в Україні в довоєнний 2021 рік. При цьому, потенціал може бути збільшено за рахунок таких факторів як збільшення урожайності основних культур, зміна структури виробництва, збільшення чисельності населення, а також за рахунок розширення переліку видів сировини новими.

В результаті процесу анаеробного зброджування утворюється біогаз, який в основному складається з метану, CO_2 та незначної кількості інших газів. Переважне поточне використання біогазу – для комбінованого

виробництва електричної та теплової енергії, останнім часом також і біометану. При цьому, при збагаченні біогазу до біометану, утворюється значна кількість газу CO_2 (від 0,5 до 0,9 nm^3CO_2 на кожен nm^3CH_4 в біогазі), який можна корисно утилізувати і, таким чином, додатково скоротити викиди парникових газів.

Ще одним продуктом анаеробного зброджування є дигестат – залишки сировини в формі концентрованої мінерально-органічної суспензії з середнім вмістом сухих речовин 3-8% та високим вмістом макро- та мікронутрієнтів в доступній для засвоєння мікроводоростями формі. За поточного використання видів та обсягів сировини для виробництва біогазу в Україні, середній вихід дигестату біогазових установок складає 1,8 т сирової маси на кожен вироблений МВт•год енергії біогазу або близько 39,1 тис. т на рік з розрахунку на 1 МВт встановленої електричної потужності когенераційної установки. В 2023 році на біогазових установках в Україні сумарно утворювалось 1,72 млн т сирового дигестату [3]. Близько 85-90% з цього обсягу складає рідка фракція дигестату після розділення на шнекових сепараторах, з вмістом сухих речовин на рівні 1-3%. Як правило, рідку фракцію вносять на поля як удобрювальний продукт, однак економічна доцільність такого внесення обмежується кількома кілометрами навколо біогазової станції. Підвищення економічної доцільності утилізації рідкої фракції дигестату є актуальною задачею для виробників біогазу. Вирощування мікроводоростей на дигестаті, з поверненням нерозділеної суспензії мікроводоростей для додаткового виробництва біогазу може бути одним з таких рішень.

Мікроводорості в 10-50 разів ефективніші з уловлювання CO_2 , ніж наземні рослини [5], і можуть фіксувати 1,83 тону CO_2 на 1 тону сухої маси МВ [6]. Фотосинтетичне перетворення неорганічного CO_2 в метаболічну енергію, яка зберігається у вигляді вуглеводів, білків і ліпідів, є фундаментальним для продуктивності водоростей. Мікроводорості, як і наземні рослини, ростуть і розмножуються за допомогою фотосинтезу. Фотосинтез – це процес, в якому енергія світла перетворюється на хімічну енергію шляхом поглинання атмосферного CO_2 відповідно до реакції (1):



Цукор, який утворюється в результаті фотосинтезу, перетворюється на інші клітинні компоненти (ліпіди, вуглеводи та білки), що утворюють клітинну масу водоростей. Мікроводорості можуть перетворювати сонячне

світло в хімічну енергію з високою фотосинтетичною ефективністю (6-8%), порівняно з наземною біомасою (1,8-2,2%) [7].

Ідея дослідження ґрунтується на гіпотезі про можливість ефективного вирощування МВ на живильному середовищі з дигестату, який містить в собі необхідні для росту МВ макро- та мікроелементи, з додаванням концентрованого CO_2 , отриманого від збагачення біогазу до біометану, та наступним перетворенням вирощеної біомаси МВ на біогаз та біометан. В результаті це дозволить, з допомогою процесу фотосинтезу, досягти більш повної конверсії органічного карбону, що міститься в сировині для виробництва біогазу, в газоподібний носій енергії – CH_4 .

Очікується, що ціна на біометан з МВ буде вищою, оскільки такий біометан вважається передовим згідно Директиви ЄС REDII (REDIII) та дозволяє досягати значних скорочень викидів парникових газів. 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, потенціал виробництва біогазу з яких складає близько 50% всього потенціалу. Відомо також, що співвідношення C: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 C:N 50-100. Таким чином, впровадження технології вирощування мікроводоростей на біогазовому заводі з рециклом рідкої фракції дигестату з МВ дозволить зменшити витрати на логістику дигестату та використання свіжої води.

Виробництво мікроводоростей у ЄС та Україні

Біомаса водоростей, яка вже широко використовується в Азії як харчовий продукт, все частіше включається в західні раціони безпосередньо для споживання людиною або використовується в різноманітних харчових цілях. Мікроводорості також широко використовуються як харчові добавки, причому деякі види є важливими джерелами специфічних компонентів, таких як антиоксиданти, пігменти, олії та вітаміни. Станом на 2022 існує 87 підприємств з виробництва мікроводоростей у 17 країнах Європи [8].

Основними сферами застосування МВ у 2022 є виробництво харчових продуктів та добавок (23%), кормів (19%), косметики (19%), фармацевтики (8%), добрив та біостимуляторів (7%), що разом становить 76% від загального виробництва в ЄС [8]. Порівняно недавно МВ

були ідентифіковані та почали використовуватись як сировина для виробництва відновлюваних видів палив, таких як біодизель, біоетанол, біогаз, біоводень тощо.

На сьогодні лідерами в ЄС за кількістю підприємств, які культивують мікроводорості для різних цілей, є Німеччина, Іспанія та Італія [9]. Офіційна статистика щодо обсягів виробництва мікроводоростей майже відсутня в європейському масштабі, так приблизне виробництво складає 182 тонни сухої ваги мікроводоростей і 142 тонни спіруліни. *Chlorella spp.* та *H. pluvialis* є найбільш виробленими мікроводоростями з точки зору об'ємів, що відповідає понад 80% загальних обсягів [9]. Офіційна статистика по виробництву МВ в Україні відсутня, але відомо про декілька підприємств які вирощують *Chlorella* та *Arthrospira* для виробництва кормів та харчових добавок.

Заводи з біопереробки водоростей були досліджені як шлях оптимізації використання багатьох компонентів вихідної сировини для різних цілей. Крім того, якщо вони підключені до іншої промислової інфраструктури, підприємства з виробництва водоростей можуть корисно використовувати пов'язані ресурси (наприклад, воду, тепло) і функціонувати як джерело додаткових функцій, таких як очищення стічних вод. Очікується, що така синергія призведе до зменшення витрат та підвищить екологічну стійкість виробництва мікроводоростей, але необхідні подальші дослідження щодо оптимізації цього підходу [9].

Даний напрямок новий для України, але має потенціал до розвитку базуючись на стрімкому розвитку його в країнах ЄС та різноманітними можливими напрямками перероблення біомаси мікроводоростей у цінні продукти та енергію, одночасно знижуючи негативний вплив на навколишнє середовище. В Україні дослідження біомаси мікроводоростей як альтернативного джерела сировини для виробництва біопалив було розпочато у 2009 році в рамках наукового проекту НАН України «Біомаса як сировина для палива». Дослідження були спрямовані на пошуку штамів МВ для виробництва біодизелю з біомаси [10,12,22].

У цілому в світі зареєстровано 22 колекції водоростей, що зберігаються в наукових установах Австралії, Америки, Японії, Китаю, Франції, Португалії, Іспанії, Англії, Німеччини, Чехії, Таїланду та України. В Україні наявні колекції мікроводоростей в Інституті ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України (акронім IBASU-B – містить 138 штамів синьо-зелених водоростей та IBASU-A – 486 штамів водоростей, а також 250 штамів супутніх бактерій, ізольованих з культур водоростей) [23], Київському національному університеті імені

Тараса Шевченка (АСКУ – 540 штамів), а також Інституті гідробіології НАН України (акронім HPDP – 39 штамів водоростей) [24].

Мікрородості як сировина для виробництва біометану

Здатність мікрородостей вилучати з водного середовища сполуки азоту, фосфору та інших речовин визначається насамперед фізіологічними особливостями виду, зокрема інтенсивністю обміну речовин та потребою в елементах живлення для підтримання їх життєдіяльності. Дослідження [17] показали, що симбіотична взаємодія мікробних консорціумів може призвести до кращого виживання, видалення поживних речовин і виробництва біомаси, порівняно з процесами, в яких використовується лише один фототрофний або гетеротрофний мікроорганізм. Мікрородості в природному середовищі як правило ростуть та функціонують консорціумом різних штамів та ціанобактерій, де функціонують складні симбіотичні процеси обміну, асиміляції та продукування різноманітних речовин. Дослідження різних видів мікрородостей встановило, що вони можуть знизити понад 98% ХПК (хімічне споживання кисню) і БПК (біологічне споживання кисню) стічної води. Вплив біоремедіації на очищення стічних вод зменшує викиди парникових газів, утворення осаду і є економічно та енергетично ефективним [18].

Основні переваги використання МВ для виробництва біопалив:

1. Мікрородості можуть перетворювати сонячне світло в хімічну енергію з високою фотосинтетичною ефективністю (6%–8%) порівняно з наземною біомасою (1,8%–2,2%).
2. Відсутність конфлікту з харчовими ланцюгами людини чи тварин.
3. Високий вміст в біомасі МВ вуглеводів, білків і жирів.
4. МВ здатні рости у водних середовищах, таких як стічні, прісні та солоні води.
5. Створюють довгостроковий метод генерації O_2 і зменшення викидів CO_2 .
6. Цикл росту та культивування мікрородостей становить близько 15 днів, на відміну від сої або інших культур, для яких цей цикл становить один або два рази на рік.
7. МВ, якщо їх культивують на землі в ставках або фотобіореакторах для виробництва біогазу для транспорту та передового біопалива – сировина з Директиви ЄС RED II, Додаток 9, яка підлягає подвійному обліку (виробництво біопалив третього покоління). Подвійний

облік означає, що для врахування поставлених цілей енергетичний вміст біопалива виробленого з сировини, яка є у додатку 9, множиться на 2.

Напрямок очищення рідкої фракції дигестату шляхом вирощування на ньому мікрородостей (біоремедіація дигестату) виник, як розв'язання поточної проблеми евтрофікації в Північно-Західній Європі, де використання дигестату як добрива для ґрунту обмежене, що призвело до впровадження політики зон, вразливих до нітратів, визначених Європейською нітратною директивою 91/676/ СЄЕ, що обмежує щорічне навантаження азоту на орні землі [19, 21]. Амоній є основною поживною речовиною, що представляє інтерес для культивування мікрородостей, і підвищення його доступності з подальшим поглинанням і має вирішальне значення для оптимальної біоремедіації. При виробництві біодизелю, медичних чи косметичних продуктів з мікрородостей найбільша стаття затрат належить стадії виділення компонентів водоростей з культуральної рідини та виділення основного компонента з біомаси. Необхідне споживання енергії для сушіння становить близько 85% від загального споживання енергії в процесі виробництва біодизеля з мікрородостей [20]. Виробництво біометану з МВ не потребує стадії виділення основних компонентів, оскільки така біомаса придатна до анаеробного зброджування, і в такому процесі всі органічні речовини (білки, вуглеводи та ліпіди), присутні в біомасі мікрородостей, будуть перетворені на метан і вуглекислий газ [25].

Можна виділити кілька переваг виробництва біогазу з цілих мікрородостей:

- виробництво біогазу шляхом вологої ферментації не вимагає сушіння біомаси;
- мікрородості можна використовувати для підвищення якості біогазу, тобто біосеквстрації CO_2 ;
- види мікрородостей, які не здатні накопичувати ліпіди, також можуть використовуватися як сировина для виробництва біогазу;
- можливе спільне зброджування з іншими видами біомаси, такими як тверді або рідкі відходи.

Умови, необхідні для росту фотоавтотрофних мікрородостей та їх присутність на біогазових установках наведені в таблиці 1.

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

Підбір виду мікрородостей для виробництва біогазу

Культивування мікрородостей може забезпечити синтез цілого ряду цінних хімічних сполук: білків, жирів, вуглеводів, вітамінів, антиоксидантів, ферментів,

Табл. 1. Умови, необхідні для росту фотоавтотрофних мікрободоростей та їх присутність на біогазових установках

Умови, необхідні для росту фотоавтотрофних мікрободоростей	Наявність на біогазових установках
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 мікрободоростей [5]	+

пігментів тощо. Яка сполука буде домінувати в хімічному складі біомаси водоростей напряму залежить від конкретного типу мікрободоростей та умов культивування. Різні види МВ демонструють різну здатність виживати та розмножуватись при наявності певних сполук, наприклад аміаку, важких металів тощо. Як наслідок, підбір типу мікрободорості – це один з ключових факторів при розробці технології вирощування МВ на РФД. Для виробництва біогазу з біомаси МВ важливим є отримання максимальної продуктивності біомаси, та здатність до біорозкладання анаеробними бактеріями біомаси вирощеної на дигестаті біогазових установок. Від продуктивності біомаси та біорозкладності буде залежати вихід біометану з біомаси, а отже і економічна доцільність технології.

Оптимальним видом мікрободоростей для максимального виробництва біогазу є такий, який має [25]:

- тонку клітинну стінку або її відсутність;
- великі клітини;
- високу швидкість росту в нестерильних середовищах;
- високу питому стійкість до природних забруднень;
- клітинну стінку на основі вуглеводів.

Хоча вихід метану залежить від складу мікрободоростей, стійкість клітинної стінки вважається обмежувальним фактором для анаеробного зброджування мікрободоростей. Кінетика анаеробного зброджування значною мірою залежить від здатності до розкладання певного виду мікрободоростей. Низькі рівні виходу метану у певних дослідженнях були пов'язані з низькою деградацією клітин і великою кількістю залишків, які погано розкладаються при анаеробному зброджуванні. Відповідно до цих результатів мікрободорості, що легко розкладаються, не мали клітинної стінки або їх клітинна стінка складалась з білка, і не містила целюлозу/геміцелюлозу [25]. Теоретичний потенціал біометану становить 470-800 м³ СН₄/т СОР. Експериментальні

дослідження показали, що продуктивність по біометану може досягати 337, 450 або 587 м³ СН₄/т СОР [33]. Питомий вихід біогазу з різних типів мікрободоростей та хімічний склад наведено в Таб. 2 та 3.

У деяких джерелах [11, 16, 32] вихід метану з мікрободоростей пов'язують з хімічним складом біомаси, але з часом це виявилось помилковим твердженням. Експериментальні дані, зібрані з літератури не демонструють сильної кореляції між вмістом ліпідів, вуглеводів і білків, знайдених у різних видах водоростей, і виходом метану, отриманим різними авторами, тому простий склад біомаси водоростей дійсно не може бути основним і єдиним фактором при виборі найкращого штаму водоростей для виробництва біометану [25]. Вирішальний вплив на вихід метану матиме саме склад клітинної стінки та продуктивність вирощування біомаси. Більшість хлорофітів (зелених мікрободоростей) мають складні та жорсткі клітинні стінки, клітинна стінка містить компоненти, вбудовані в матрикс, що містить уронові кислоти разом з іншими нейтральними цукрами. 40% компонентів мікрободоростей легко доступні для виробництва біометану, решта 60% потребують попередньої обробки, щоб зробити внутрішньоклітинний вміст доступним [26].

Також у [26] повідомляють про 4 типи клітинних стінок відповідно до їх будови та складності. Більш висока стійкість оболонки до деградації для мікрободоростей пов'язана з наявністю спороподібних біополімерів. Іншою неперетравлюваною сполукою в клітинній стінці мікрободоростей є альгенан, який є негідролізованим стійким біополімером, що складається з пов'язаних поліефіром довголанцюгових п-алкільних одиниць. Нерозкладний біополімер альгенан присутній у таких водоростях як *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Haematococcus*, *Nannochloropsis*, що ускладнює виробництво з них біогазу, тому що для руйнування їхньої клітинної стінки буде потрібна попередня обробка і це призведе до збільшення операційних витрат [26].

Табл. 2. Хімічний склад різних видів мікроводоростей, % [27]

Вид	Білки	Вуглеводи	Жири	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</i> sp.	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> sp.	63	15	11	5
<i>Anabaena cylindrica</i>	43 – 56	25 – 30	4 – 7	–

Табл. 3. Питомий вихід різних видів мікроводоростей отриманий в результаті батч тесту [27]

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

В результаті літературного пошуку для аналізу та підбору оптимальних видів було обрано 6 видів мікроводоростей, що є найбільш розповсюдженими в очищенні стічних вод та для виробництва біопалив, а саме: *Euglena gracilis*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella* sp., *Scenedesmus*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Spirulina*

platensis. *Chlorella vulgaris* була першою водорістю, яка стала об'єктом інтенсивного промислового культивування. Проте в цілому ця водорість виявилась неоптимальною для виробництва біогазу, оскільки її клітини мають дуже міцну та хімічно стійку оболонку з шаром спорополеніну. Вдалішим об'єктом вия-

вився *Scenedesmus*, але обидва типи потребуватимуть попередньої обробки перед анаеробною ферментацією через структуру їх клітинних стінок [13].

Варто зазначити, що не дивлячись на складну КС, *Chlorella* демонструє найвищий показник швидкості росту та єдина витримує високі концентрації CO_2 в газах (40-100%) [14], що буде корисним для подачі в якості джерела вуглецю концентрованого CO_2 після збагачення біогазу до біометану. *Dunaliella* має просту клітинну стінку і з погляду біорозкладності є оптимальним варіантом для виробництва біогазу, але для оптимального росту потребує солоного середовища, тому потребуватиме додаткового додавання солей. *Chlamydomonas reinhardtii* широко обирається для експериментів з біопаливом через її переваги, такі як швидкий ріст, сильна адаптивність і легке вирощування. *Euglena gracilis* характеризується високою стійкістю до високих концентрацій азоту та фосфору, і відповідно до результатів експериментальних досліджень була встановлена її здатність ефективно видаляти сполуки азоту та фосфору з побутових стічних вод [15].

Отже, оптимальними стосовно такого фактора як біорозкладність виглядають види *Euglena gracilis* та *Chlamydomonas reinhardtii*, які мають менш складну КС і відсутність полімерів, що не розкладаються, і також здатні витримувати високі концентрації амонійного азоту, що важливо у випадку використання дигестату.

Дигестат для вирощування МВ

Біогазові станції, як правило, працюють безперервно протягом року, що обумовлює необхідність накопичення дигестату на періоди між осіннім та весняним внесеннями на поля. При тривалому зберіганні дигестату у відкритих резервуарах або лагунах пропорційно збільшуються викиди в атмосферу метану (до 5-10% його потенціалу в сировині). На більшості діючих біогазових установок, у т.ч. і в Україні, обробка «сирого» дигестату обмежується розділенням на рідку і тверду фракції. Подальша обробка дигестату потребує додаткових витрат, а тому повинна бути обґрунтованою. Сепарація призводить до утворення двох продуктів: 1) твердої фракції із вмістом сухої речовини 20-40%, збагаченої вуглецем та фосфором, та 2) рідкої фракції зі вмістом сухих речовин 1-8%, збагаченої азотом та калієм [16]. Низький вміст СР у РФД робить недоцільним її транспортування на далекі відстані. При відсутності полів для внесення РФД, необхідними є ефективні рішення по його утилізації, або значні площі для накопичення та зберігання. В цілому РФД має у своєму складі необхідні поживні речовини для вирощування МВ, але є деякі фактори, які можуть інгібувати МВ, і їх варто враховувати при підготовці дигестату до культивування МВ.

Властивості дигестату що можуть негативно вплинути на ріст біомаси мікроводоростей [28,29] :

1. Каламутність (вміст завислих речовин). Через перешкоджання проникненню світла, підвищена каламутність пригнічує утворення мікроводоростей внаслідок порушення процесу фотосинтезу.

2. Концентрація амонійного азоту та аміаку. В дигестаті залежно від сировини біогазової станції може бути різна концентрація амонійного азоту (1000–3000 мг/л), тоді як концентрації понад 100 мг/л є шкідливими для більшості штамів мікроводоростей. Вільний аміак може проходити через клітинну мембрану мікроорганізмів, розривати та лізувати клітини. Зменшення темпів росту водоростей на 77% відбувається для *Scenedesmus sp.* при підвищенні рівня вільного аміаку в дигестаті з 9 до 34 мг/л.

3. Недостатня кількість фосфору в дигестаті може вплинути на культивування мікроводоростей. Оптимальне для росту мікроводоростей співвідношення азот/фосфор становить на рівні 7.

4. Біосорбція та біоаккумуляція є основними механізмами, за допомогою яких водорості видаляють важкі метали з анаеробного рідкого дигестату. Марганець, нікель, мідь, молібден, залізо та цинк є необхідними для росту клітин водоростей як мікроелементи та кофактори у ферментативних реакціях. Важкі метали, концентрація яких перевищує граничні межі, негативно впливають на процес біоремедіації.

5. Наявність патогенів та сторонньої мікрофлори.

Основні етапи підготовки РФД до культивування МВ:

- фільтрування крізь паперовий або мембранний фільтр для видалення завислих речовин;
- розведення водою у 10-30 разів для зменшення кольоровості та концентрації амонійного азоту;
- знезараження або підбір типу або консорціуму МВ і бактерій здатного рости в нестерильних умовах;
- додавання необхідних елементів або ростових сумішей.

Фотобіореактори для культивування МВ

Системи масового виробництва мікроводоростей і ціанобактерій розділяються на три основних види: ставки, фотобіореактори (PBR), системи з біоплівки або їх комбінація. Хоча ставки відносно прості та недорогі порівняно з фотобіореакторами, вони потребують великої площі землі, неефективні щодо уловлювання викидів CO_2 , піддаються впливу несприятливих погодних умов (дощ, випаровування тощо), і можуть легко забруднюватися, що є недоліком для певних застосувань, таких як вирощування продуктів харчування та кормів.

Фотобіореактори надійніші, але значно дорожчі за розміром CAPEX та OPEX. Конструктивно біореактори є досить складними інженерними системами. Для забезпечення оптимальних умов росту мікроводоростей необхідним є постійний контроль і підтримання на певному рівні цілого ряду параметрів: умов асептики, температурного режиму, pH, окисно-відновного потенціалу середовища, концентрації розчиненого кисню, забезпеченості вуглекислотою та основними поживними речовинами, швидкості руху рідини, інтенсивності перемішування. PBR конструюють з високим співвідношенням площі поверхні до об'єму культури для досягнення максимальної ефективності

освітлення. Однак той самий принцип призводить до втрат тепла за відсутності світла. Розуміння залежного від часу теплового балансу в PBR має вирішальне значення для точного прогнозування продуктивності [31].

PBR можливо класифікувати відповідно до їх конструкції, включаючи орієнтацію, механізму циркуляції культури, способу освітлення та конструкції, режиму роботи (періодичний/безперервний), режиму культивування тощо [30].

В промислових масштабах найбільш поширені є трубчасті системи, але кожна з систем має свої переваги та недоліки. Тип PBR доцільно підбирати відповідно до цілей проєкту, географії розташування, потреби в

Табл. 4. Порівняння різних систем фотобіореакторів та їх продуктивності [27, 26, 32]

Система PBR	Переваги	Недоліки	Продуктивність втрати біомаси, г/л*добу
Відкриті ставки	Економічність Легко чистити Низька енергомісткість Легко масштабуються Низькі затрати на обслуговування	Важко контролювати параметри Низька продуктивність біомаси Здатність до контамінації Потребує великої площі Неефективне змішування	0,03–0,2
Колонні PBR	Ефективний масообмін Ефективне змішування Легкість стерилізації Компактність Потенціал до масштабування Зменшене фото інгібування та фото окислення Низькі енергозатрати	Мала поверхня освітлення Дорожче ніж відкриті ставки Складність конструкції та матеріалів	0,5-10
Трубчасті PBR	Велика поверхня освітлення Підходять для розміщення на вулиці Хороша продуктивність Відносно недорогі Можливе масштабування Легкий контроль процесу Рівномірне перемішування Хороший контроль температури	pH градієнт Втрати Обростання на стінках Потребує значних площ Гідродинамічний стрес Можливість низького газообміну	0,35-1,5
Плоскі PBR	Велика поверхня освітлення Підходить для вуличного виконання Короткий світловий шлях Висока продуктивність біомаси Відносно недорогі Легко очищати Низький вміст кисню в системі	Важко масштабовані Важко контролювати температуру Ризик наростання плівки на стінках Можливість гідродинамічного стресу	1,5 - 28

масштабуванні. У випадку вирощування МВ на дигестаті такою ціллю є отримання максимальної продуктивності вирощування біомаси МВ. Переваги та недоліки різних систем фотобіореакторів та можлива продуктивність вирощування біомаси наведені в Таблиці 4. Найбільш доцільними є плоскопанельний PBR, оскільки саме в ньому можна отримати максимальну продуктивність біомаси 1,5-28 г/л*добу, скорочуючи світловий шлях (товщину) фотобіореактора.

Впровадження культивування МВ на біогазовому/ біометановому заводі

Впровадження технології вирощування мікроводоростей в існуючі біогазові установки видається найбільш ефективним технологічним рішенням для утилізації РФД. У квітні 2024 р. стартував дослідницький проєкт: «Виробництво передового біометану з мікроводоростей, 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). Проєкт переміг у конкурсі InnovateUkraine, який фінансується UK International Development та організований посольством Великої Британії в Україні. Основною метою проєкту є створити:

1. Новий економічний та енергоефективний процес культивування мікроводоростей на дигестаті біогазових станцій.

2. Новий економічний та енергоефективний процес виробництва біометану за допомогою анаеробного зброджування (AD) зібраних мікроводоростей.

На Рис. 1 показана схема інтеграції культивування МВ на БГУ, яка досліджуватиметься у згаданому

проєкті 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 основою сировиною перед подачею в БГУ.

Щоб досягти рентабельного виробництва передового біометану з мікроводоростей, собівартість виробництва мікроводоростей має становити менш ніж 0,2 євро/кг СР мікроводоростей. Цього планується досягнути впроваджуючи наступні заходи :

- використання дигестату біометанових установок як джерела вільного вуглецю, поживних речовин і тепла для культивування мікробіодоростей;
- використання CO_2 , який є відходом виробництва біометану, для культивування МВ;
- збільшення продуктивності вирощування мікробіодоростей в PBR до 5 г СР/(л*добу) шляхом використання тонкошарових плоских PBR;
- зниження енергоспоживання при виробництві біомаси водоростей до 0,02 кВт*год/кг СР водоростей внаслідок використання скидного тепла та CO_2 для процесу та значного зменшення потреб у зневодненні мікробіодоростей у разі їх використання для виробництва біометану;
- збільшення вартості біометану шляхом зниження коефіцієнта вуглецевої інтенсивності виробленого біометану (до від'ємних значень) внаслідок утилізації CO_2 для культивування мікробіодоростей;

Інтеграція вирощування мікроводоростей у технологію анаеробного зброджування і виробництва біометану є найбільш ефективним і перспективним способом вирощування мікроводоростей, оскільки більшість необхідних для цього компонентів, таких як технологічне тепло, CO₂, поживні речовини, вода, транспортування мікроводоростей для кінцевого використан-

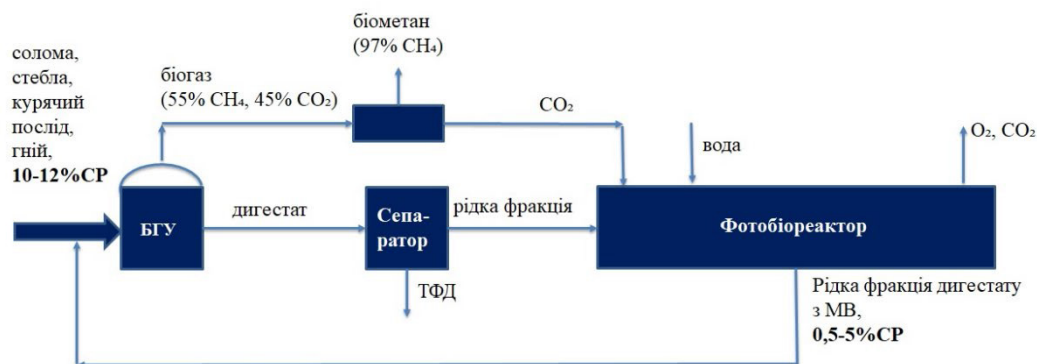


Рис. 1. Схема інтеграції культивування МВ на біогазовому/біометановому заводі

ня, є майже безкоштовними. Єдині витрати залишаються небезкоштовними - на електроенергію для освітлення, але їх можна мінімізувати, використовуючи сонячну електроенергію, накопичувачі енергії та електроенергію з біогазу. Потенційно внаслідок анаеробного зброджування біомаси водоростей можна збільшити річне виробництво біометану на діючій установці на 9,4 %, як було розраховано для аналогічного проекту у Швеції [33].

Висновки

Мікрроводорості демонструють високу фотосинтетичну ефективність і врожайність (майже вдвічі більшу, ніж у наземних рослин) і є перспективними для виробництва біоенергії, в першу чергу біогазу і біометану. У найближчій перспективі існують можливості використання мікрроводоростей в інтегрованому біопереробному заводі для виготовлення більш цінних харчових продуктів, кормів, нутрицевтики та олеохімічних біопродуктів. Потреби в ресурсах (вода, земля, світло, тепло, джерело CO₂) і поживних речовинах (N, P, K) залишаються ключовими проблемами економічної та екологічної ефективності процесу вирощування мікрроводоростей, інтеграція якого в біометанові установки представляється найбільш життєздатною стратегією.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року.* https://sae.gov.ua/sites/default/files/DraftNPDVE_2030_SAE_21_09_2022.pdf
2. *Biomethane: Setting a target that is fit for food and the climate – An analysis of biomethane feedstocks to help fast forward sustainable energy and food system transformation*, Rijswijk, 2023 the Netherlands: Feedback EU.
3. *EBA Statistical Report 2023.*
4. *Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Кучерук П.П.* Перспективи виробництва передових біопалив в Україні. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2023. Т. 76, № 3. С.71-82. <https://www.etars-journal.org/index.php/journal/issue/view/3740>
5. *Wang B., Li Y., Wu N. and Lan C. Q.* CO₂ biomitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008. Vol.79(5), P. 707-718. DOI: 10.1007/s00253-008-1518-y

6. *Chisti Y.* Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007. Vol.25(3), P. 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
7. *Di Caprio F., Altamari P., Pagnanelli F.* New strategies enhancing feasibility of microalgae cultivations. *Catalysis, Green Chemistry and Sustainable Energy. New technologies for novel business opportunities.* Elsevier Science. 2020. Vol.179, P.287-316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00016-1>
8. *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.
9. *Rita Araújo, Fatima Vázquez Calderón, Javier Sánchez López, Isabel Costa Azevedo, Annette Bruhn, Silvia Fluch, Manuel Garcia Tasende, Fatemeh Ghaderi Ardakani, Tanel Ilmjärvi, Martial Laurans, Micheal Mac Monagail, Silvio Mangini, César Peteiro, Céline Rebours, Tryggvi Stefansson, Jörg Ullmann.* Current Status of the Algae Production Industry in Europe. An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.626389/full>
10. *Petro M. Tsarenko, Olena V. Borysova, Vitaly I. Korkhovy and Yaroslav B. Blume.* High-Efficiency Ukrainian Strains of Microalgae for Biodiesel Fuel Production (Overview). *The open agriculture journal*. (2020). URL: <https://openagriculturejournal.com/VOLUME/14/PAGE/209/FULLTEXT/>
11. *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
12. *Sorochinsky B, Blume Ya, Sozinov O.* Liquid Biofuels: Current state and tendencies 2010.
13. *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-careno-p-m-algologiya-rupokis-pidruchnika-dlya-studentiv-3-4-kursu-specialnosti-botanika.html>
14. *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>

15. I. Nezbyrsky, 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
16. Bernhard Drosch et al. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* / IEA Bioenergy, 2015
17. Shousong Zhu, Lauren Higa, Antonia Barela, Caitlyn Lee, Yinhua Chen, Zhi-Yan Du. Microalgal Consortia for Waste Treatment and Valuable Bioproducts. *Energies* 2023, 16, 884. <https://doi.org/10.3390/en16020884>
18. Radhakrishnan Vandana. Suchitra Rakesh. *Phyco-Remediation of Sewage Wastewater by Microalgae*. 2022. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/85343#B24>
19. Fuchs, W. Drosch, B. Assessment of the State of the Art of Technologies for the Processing of Digestate Residue from Anaerobic Digesters. *Water Sci. Technol.* 2013, 67, 1984–1993.
20. 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
21. Fernandes, F. Silkina, A. Gayo-Peláez, J. I. Kapoore, R. V. de la Broise, D. Llewellyn, C. A. Microalgae Cultivation on Nutrient Rich Digestate: The Importance of Strain and Digestate Tailoring under pH Control. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5429. <https://doi.org/10.3390/app12115429>
22. Tsarenko P., Borysova O., Blume Ya. Microalgae as bioenergetic object: IBASU-A collection species – perspective producers of biomass as the source of raw stuff for biofuel. *Visnyk Nat Acad Sci Ukraine* 2011; 5: 49-54.
23. О.В. Борисова, П.М. Царенко, М.О. Коніщук, О.В. Бурова. Мікрроводорості колекції IBASU-A Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України / Київ, 2020. 131 с. URL: https://www.botany.kiev.ua/doc/mikrovod_IBASU-A_2020.pdf
24. Білоус О. П., Незбрицька І. М., Ключенко П. Д., Кірпенко Н. І. Колекція культур мікрроводоростей HPDP. – Київ, 2018. – 36 с.
25. Álvaro Torres, Fernando G. Fermoso, 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>
26. 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
27. 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
28. Ahmed Tawfik, Mohamed Eraky, Nawaf S. Alhajeri, Ahmed I. Osman & David W. Rooney. Cultivation of microalgae on liquid anaerobic digestate for depollution, biofuels and cosmetics: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-022-01481-2>
29. Serna-García R, Ruiz-Barriga P, Noriega-Hevia G et al. Maximising resource recovery from wastewater, grown microalgae and primary sludge in an anaerobic membrane co-digestion pilot plant coupled to a composting process. *Journal of Environmental Management*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720318156?via%3Dihub>
30. Anas Al-Dailami, Iwamoto Koji, Imran Ahmad I, Masafumi Goto. Potential of Photobioreactors (PBRs) 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.27.1.3244>
31. 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>
32. Amos Richmond. *Handbook of Microalgae Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell Science Ltd. URL: <https://alगतex.org/ebook/Handbook%20of%20microalgal.pdf>
33. Xiaoqiang Wang, Eva Nordlander I, Eva Thorin and Jinyue Yan. Microalgal biomethane production integrated with an existing biogas plant: a case study in Sweden. *International Conference on Applied Energy, ICAE*. 2012. China ID: ICAE2012- A10560

OPPORTUNITIES OF ADVANCED BIOMETHANE PRODUCTION FROM MICROALGAE GROWN ON BIOGAS PLANT DIGESTATE. Part 1.

Geletukha G.G.¹, Hyvel M.M.², Kucheruk P.P.³

¹Dr.Sci., 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>

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

³PhD, 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>

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7>

The purpose of the work is to review technologies and analyze the possibility of introducing microalgae cultivation at biogas/biomethane plants while simultaneously obtaining of additional biomethane yield and utilization of the liquid fraction of the digestate. Modern technologies, types and equipment for growing microalgae on the liquid fraction of digestate of biogas plants were considered and analyzed. The current situation of biogas/biomethane production in Ukraine and disposal of the liquid digestate fraction is presented. The chemical composition of the digestate and the methods of its preparation for the cultivation of microalgae were analyzed. Recommendations and a block scheme for technology implementation at a biogas/biomethane plant have been developed. Today, one of the most economically profitable options for Ukraine is the production of biomethane. On the other hand, there is a clear need for innovative, low-cost, safe production of biomethane using alternative, high-yield biomass that can utilize waste feedstock and also sequester carbon. Microalgae is a promising biomass that can convert nutrient-rich digestate into valuable biomass for biofuel and biodiesel production and is considered as a double-counting feedstock (RED II Directive, Annex 9). Microalgae demonstrate high photosynthetic efficiency and productivity (almost twice that of terrestrial plants) and are promising for advanced biomethane production. Integrating microalgae harvesting into an anaerobic digestion plan is the most efficient and promising way to harvest microalgae, as most of the components required for microalgae harvesting are almost free under the following conditions:

process heat, CO₂, nutrients, water, transport of microalgae to end use. Electricity alone for lighting is not free, but can be minimized by using solar energy, energy storage and biogas electricity. Algae biomass can potentially increase the annual production of biomethane at an existing plant by 9.4%, as was achieved for a similar project in Sweden [33].

References 33, table 4, figures 1.

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

1. *Natsionalnyi plan diy z rozvutky vidnovlyvanoj energetyky na period do 2030 roky*. [National action plan for the development of renewable energy for the period up to 2030]. (Ukr.) https://sae.gov.ua/sites/default/files/DraftNPDVE_2030_SAE_21_09_2022.pdf

2. *Biomethane: Setting a target that is fit for food and the climate – An analysis of biomethane feedstocks to help fast forward sustainable energy and food system transformation*, Rijswijk, 2023 the Netherlands: Feedback EU.

3. *EBA Statistical Report 2023*.

4. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Kucheruk P.P.* Perspektyvy 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.eters-journal.org/index.php/journal/issue/view/37/40>

5. *Wang B., Li Y., Wu N. and Lan C. Q.* CO₂ biomitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008. Vol.79(5), P. 707-718. DOI: 10.1007/s00253-008-1518-y

6. *Chisti Y.* Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007. Vol.25(3), P. 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

7. *Di Caprio F, Altamari P, Pagnanelli F.* New strategies enhancing feasibility of microalgae cultivations. *Catalysis, Green Chemistry and Sustainable Energy. New technologies for novel business opportunities*. Elsevier Science.2020. Vol.179, P.287-316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00016-1>

8. *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.

9. Rita Araújo, Fatima Vázquez Calderón, Javier Sánchez López, Isabel Costa Azevedo, Annette Bruhn, Silvia Fluch, Manuel Garcia Tasende, Fatemeh Ghaderi Radakani, Tanel Ilmjärvi, Martial Laurans, Micheal Mac Monagail, Silvio Mangini, César Peteiro, Céline Rebours, Tryggvi Stefansson, Jörg Ullmann. Current Status of the Algae Production Industry in Europe. An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.626389/full>
10. Petro M. Tsarenko, Olena V. Borysova, Vitaly I. Korkhovy and Yaroslav B. Blume. High-Efficiency Ukrainian Strains of Microalgae for Biodiesel Fuel Production (Overview). *The open agriculture journal*. (2020). URL: <https://openagriculturejournal.com/VOLUME/14/PAGE/209/FULLTEXT/>
11. 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
12. Sorochinsky B, Blume Ya, Sozinov O. Liquid Biofuels: Current state and tendencies 2010.
13. 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-careno-p-m-algologiya-rukopis-pidruchnika-dlya-studentiv-3-4-kursu-specialnosti-botanika.html>
14. 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>
15. Nezbyrsky, 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
16. Bernhard Drosig et al. Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing / IEA Bioenergy, 2015
17. Shousong Zhu, Lauren Higa, Antonia Barela, Caitlyn Lee, Yinhua Chen, Zhi-Yan Du. Microalgae Consortia for Waste Treatment and Valuable Bioproducts. *Energies* 2023, 16, 884. <https://doi.org/10.3390/en16020884>
18. Radhakrishnan Vandana. Suchitra Rakesh. Phyco-Remediation of Sewage Wastewater by Microalgae. 2022. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/85343#B24>
19. Fuchs, W. Drosig, B. Assessment of the State of the Art of Technologies for the Processing of Digestate Residue from Anaerobic Digesters. *Water Sci. Technol.* 2013, 67, 1984–1993.
20. 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
21. Fernandes, F. Silkina, A. Gayo-Peláez, J.I. Kapoore, R.V. de la Broise, D. Llewellyn, C.A. Microalgae Cultivation on Nutrient Rich Digestate: The Importance of Strain and Digestate Tailoring under PH Control. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5429. <https://doi.org/10.3390/app12115429>
22. Tsarenko P, Borysova O, Blume Ya. Microalgae as bioenergetic object: IBASU-A collection species – perspective producers of biomass as the source of raw stuff for biofuel. *Visnyk Nat Acad Sci Ukraine* 2011; 5: 49-54.
23. O.V. Borisova, P.M. Tsarenko, M.O. Konishchuk, O.V. Burova. Microvodorosti kolektsii IBASU-A Instytutu botaniku imeni M.G. Holodnogo Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy [Microalgae of the IBASU-A collection of the Institute of Botany named after M.G. Kholodnoy National Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv, 2020. 131 p. (Ukr.) URL: https://www.botany.kiev.ua/doc/mikrovod_IBASU-A_2020.pdf
24. Bilous O. P., Nezbyrsky I. M., Klochenko P. D., Kirpenko N. I. Kolektsia kul'tyr mikrovdorostey HPDP. [HPDP microalgae culture collection.] - Kyiv, 2018. - 36 p. (Ukr.)
25. Álvaro Torres, Fernando G. Feroso, 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>
26. 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
27. Jerry D Murphy, Bernhard Drosig, 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
28. Ahmed Tawfik, Mohamed Eraky, Nawaf S. Alhajeri, Ahmed I. Osman & David W. Rooney. Cultivation of microalgae on liquid anaerobic digestate for depollution, biofuels and cosmetics: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-022-01481-2>

29. *Serna-García R, Ruiz-Barriga P, Noriega-Hevia G et al.* Maximising resource recovery from wastewater, grown microalgae and primary sludge in an anaerobic membrane co-digestion pilot plant coupled to a composting process. *Journal of Environmental Management*. 2021 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720318156?via%3Dihub>
30. *Anas Al-Dailami, Iwamoto Koji, Imran Ahmad I, Masafumi Goto.* Potential of Photobioreactors (PBRs) 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.27.1.3244>
31. *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>
32. *Amos Richmond Handbook of Microalgae Culture: Biotechnology and Applied Phycology.* Blackwell Science Ltd. URL; <https://algaetex.org/ebook/Handbook%20of%20microalgal.pdf>
33. *Xiaoqiang Wang, Eva Nordlander I, Eva Thorin and Jinyue Yan.* Microalgal biomethane production integrated with an existing biogas plant: a case study in Sweden. *International Conference on Applied Energy, ICAE*. 2012. China ID: ICAE2012- A10560

Отримано 08.08.2024

Received 08.08.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024