

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) біотехнології та екологічного контролю
Кафедра біотехнології і мікробіології

«До захисту в ЕК»
Декан факультету
Наталія ГРЕГІРЧАК
(підпис) (ім'я та прізвище)

« 08 » грудня 2025 р.

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
Віктор СТАБНІКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

« 08 » грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Промислова та фармацевтична біотехнологія»
на тему: «Технологія модернізації біометанових заводів для інтегрованого виробництва цінних продуктів з водоростей»

Виконав: здобувач II курсу, групи ПФБ-2-1М

СИДОРЕНКО Микола Русланович
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник СТАБНІКОВ Віктор Петрович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Консультанти _____
(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

_____ (ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент Георгій ГЕЛЕТУХА
(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Я, як здобувач Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Біотехнології та екологічного контролю

Кафедра біотехнології і мікробіології

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Промислова та фармацевтична біотехнологія»

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри біотехнології і
мікробіології

Віктор СТАБНІКОВ

“ 01 ” жовтня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

СИДОРЕНКА Миколи Руслановича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Технологія модернізації біометанових заводів для інтегрованого виробництва цінних продуктів з водоростей

керівник роботи СТАБНІКОВ Віктор Петрович, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 05.11.2025 року № 912-к

2. Строк подання здобувачем роботи 26.11.2025

3. Вихідні дані до роботи Водорості та ціанобактерії, цільовий продукт біометан та біодизель

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) РЕФЕРАТ; ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ВОДОРОСТІ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЇ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ; РОЗДІЛ 2. ВИРОБНИЦТВО ПРОВІДНОГО БІОДИЗЕЛЯ З ВОДОРОСТЕЙ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЙ; РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ ІНТЕГРАЦІЇ ВОДОРОСТЕЙ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЙ НА БІОМЕТАНОВИХ ЗАВОДАХ; РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ; РОЗДІЛ 5. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАДІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ; РОЗДІЛ 6. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ; РОЗДІЛ 7. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА; РОЗДІЛ 8. ПРОЄКТ ЗАЯВКИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

5. Перелік графічного матеріалу

Технологічна схема - 1 аркуш формату А1. Апаратурна схема - 3 аркуші формату А1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	РОЗДІЛ 1. ВОДОРОСТІ ТА ЦΙΑНОБАКТЕРІЇ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ	01.10.2025 – 07.10.2025	Виконано
2.	РОЗДІЛ 2. ВИРОБНИЦТВО ПРОВІДНОГО БІОДИЗЕЛЯ З ВОДОРОСТЕЙ ТА ЦΙΑНОБАКТЕРІЙ	08.10.2025 – 10.10.2025	Виконано
3.	РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ ІНТЕГРАЦІЇ ВОДОРОСТЕЙ ТА ЦΙΑНОБАКТЕРІЙ НА БІОМЕТАНОВИХ ЗАВОДАХ	11.10.2025 – 14.10.2025	Виконано
4.	РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	15.10.2025 – 19.10.2025	Виконано
5.	РОЗДІЛ 5. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАДІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	20.10.2025 – 27.10.2025	Виконано
6.	РОЗДІЛ 6. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ	28.10.2025 – 29.10.2025	Виконано
7.	РОЗДІЛ 7. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА	30.10.2025 – 12.11.2025	Виконано
8.	РОЗДІЛ 8. ПРОЄКТ ЗАЯВКИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ	13.11.2025 – 17.11.2025	Виконано
9.	Оформлення пояснювальної записки	18.11.2025 – 21.11.2025	Виконано
10.	Виконання графічної частини	22.11.2025 – 26.11.2025	Виконано

Здобувач

(підпис)

Микола СИДОРЕНКО

(ім'я та прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Віктор СТАБНІКОВ

(ім'я та прізвище)

ABSTRACT

This thesis is devoted to the development of technology for the integrated production of value-added products at biomethane plants using algae. Within the scope of this work, the current scientific literature was analyzed and, based on it, a diagram of the entire process was drawn up, a preliminary technical and economic feasibility study was calculated, the selection of post-fermentation stages for the extraction of valuable products was justified, the material balance was calculated, and the necessary equipment was selected. In addition, a technological diagram was drawn up taking into account the stages of auxiliary work and the technological process, and an equipment diagram of the technology was drawn up indicating material flows.

The novelty of the qualification work is the introduction of the cultivation of *Scenedesmus* abundance algae using CO₂ from the process of upgrading biogas to biomethane at biomethane plants as the main source of carbon nutrition, with the aim of additional production of biomethane, biodiesel, protein-amino acid concentrate, and pheophorbide to improve the profitability of these productions. with the aim of additional production of biomethane, biodiesel, protein-amino acid concentrate, as well as pheophorbide to improve the profitability of these productions.

The qualification work consists of an introduction, eight chapters, a list of 123 references, and an equipment and technological diagram. The total volume of the work is 136 pages, and it also includes 13 figures and 13 tables.

Keywords: algae, biomethane, biodiesel, pheophorbide, *Scenedesmus abundans*, protein-amino acid concentrate.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці технології для інтегрованого виробництва продуктів з доданою вартістю на біометанових заводах з водоростей. У межах цієї роботи було проаналізовано сучасну наукову літературу та на її основі складено схему всього процесу, прораховано попереднє техніко-економічне обґрунтування, також обґрунтовано підбір післяферментаційних стадій виділення цінних продуктів, розраховано матеріальний баланс та підібрано необхідне обладнання. Крім того, складено технологічну схему з врахування стадій допоміжних робіт та технологічного процесу, а також складено апаратурну схему технології з зазначенням матеріальних потоків. Також було розглянуто

Новизною кваліфікаційної роботи є впровадження культивування водоростей *Scenedesmus abundance* з використанням CO₂ від процесу покращення біогазу до біометану на біометанових заводах, як основного джерела вуглецевого живлення, з метою додаткового виробництва біометану, біодизелю, білково-амінокислотного концентрату, а також феофорбиду, щоб покращити рентабельність цих виробництв.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, восьми розділів, списку літератури з 123 найменувань, апаратурної та технологічної схеми. Загальний обсяг роботи склав 136 сторінок, також в роботі присутні 13 рисунків та 13 таблиць.

Ключові слова: водорості, біометан, біодизель, феофорбід, *Scenedesmus abundans*, білково-амінокислотного концентрат.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ВОДОРОСТІ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЇ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ	10
1.1 Анаеробне зброджування моносубстратів	10
1.2 Анаеробне зброджування залишків біомаси водоростей та ціанобактерій після виділення практично цінних продуктів	13
1.3 Анаеробне зброджування зі змішуванням субстратів	16
РОЗДІЛ 2. ВИРОБНИЦТВО ПРОВІДНОГО БІОДИЗЕЛЯ З ВОДОРОСТЕЙ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЙ	19
2.1 Огляд технологій трансестерифікації біомаси та ліпідів	19
РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ ІНТЕГРАЦІЇ ВОДОРОСТЕЙ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЙ НА БІОМЕТАНОВИХ ЗАВОДАХ	23
3.1 Вирощування водоростей та ціанобактерій на дигестаті	23
3.2 Використання водоростей та ціанобактерій для покращення якості біогазу	29
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	34
4.1 Характеристика біотехнологічних продуктів	34
4.1.1 Біометан	34
4.1.2 Біодизель	36
4.1.3 Білково-амінокислотний концентрат	38
4.1.4 Феофорбід	39
4.2 Огляд ринку цільової продукції	40
4.3 Розрахунок річної потужності виробництва	44
4.4 Розрахунок блоку культивування водоростей	46
РОЗДІЛ 5. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАДІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	49
5.1 Структура та ключові етапи технологічного процесу	49
5.2 Обґрунтування вибору післяферментаційних процесів отримання біотехнологічних продуктів	51
5.2.1 Вибір методу збирання біомаси	52
5.2.2 Вибір методу попередньої обробки біомаси	53
5.2.3 Вибір комплексного методу виділення продуктів	54
5.2.4 Вибір методів випарювання	55
5.2.5 Вибір методів сушіння	56
5.2.6 Обґрунтування допоміжних стадій для післяферментаційних процесів	57
5.3 Обґрунтування кінцевої форми цільових продуктів	57
5.3.1 Обґрунтування форми випуску біометану	57
5.3.2 Обґрунтування форми випуску та вибору упаковки для феофорбїду	59
5.3.3 Обґрунтування форми випуску та вибору упаковки для білково-амінокислотного концентрату	60
5.3.4 Обґрунтування вибору упаковки для біодизелю	60
5.4 Підбір технологічного обладнання з урахуванням матеріальних потоків	61
5.4 Специфікація обладнання	73
РОЗДІЛ 6. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ	82
РОЗДІЛ 7. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА	92
7.1 Підбір методів контролю виробництва	92

7.1.1 Альгологічний контроль.....	92
7.1.3 Визначення зольності та сухих органічних речовин	93
7.1.4 Визначення концентрації біомаси	95
7.1.5 Визначення вмісту хлорофілу	96
7.1.6 Визначення вмісту білку.....	97
7.1.7 Визначення вмісту ліпідів	98
7.1.8 Визначення вмісту полісахаридів.....	99
7.3 Підбір методів контролю показників якості біодизелю	100
7.3.1 Визначення температури спалаху.....	100
7.3.2 Визначення цетанового числа	100
7.3.3 Визначення густини	101
7.3.4 Визначення кінематична в'язкості	102
7.3.5 Визначення йодного числа	103
7.3.6 Визначення кислотного числа.....	104
7.3.7 Визначення окисної стабільності.....	105
7.3.8 Визначення коксового залишку	105
7.3.9 Визначення корозії мідної пластини	106
7.3.10 Визначення масової частки сульфатної золи.....	107
7.3.11 Визначення вмісту води.....	107
7.3.12 Визначення масової частки моно- ди- тригліцеридів, вільного гліцерину та загального гліцерину	108
7.3.13 Визначення масової частка фосфору.....	110
7.4 Підбір методів контролю показників якості концентрату білків	111
7.4.1 Визначення загального білку	111
7.4.2 Визначення амінокислотного складу	113
7.4.3 Визначення вологості.....	114
7.5 Підбір методів контролю показників якості феофорбіду	115
7.5.1 Визначення вмісту феофорбіду.....	115
7.5.2 Визначення вмісту вологи.....	116
РОЗДІЛ 8. ПРОЄКТ ЗАЯВКИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ	117
ВИСНОВКИ.....	121
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	122

ВСТУП

Прагнення до без вуглецевої економіки, закріплене у Європейському зеленому курсі (Green Deal), ставить амбітну мету — до 2050 року значно скоротити викиди парникових газів. У цьому контексті біометан набуває все більшої популярності як перспективне джерело енергії. На відміну від біоводню, розвиток якого гальмує висока вартість електроенергії для його виробництва, біометан демонструє високу економічну ефективність та екологічну прийнятність (Baumgart, Lavrijssen, 2024).

За оцінками Біоенергетичної Асоціації України (Гелетуха та інші, 2025) біометановий потенціал нашої країни оцінюється в 21,85 млрд $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{рік}$, варто очікувати, що кількість біометанових виробництв до 2050 року буде оцінюватись навіть не десятками, а сотнями.

Незважаючи на існуючі проблеми та ризики, сектор виробництва біометану в Україні перебуває в «золотій» добі, яка характеризується високою зацікавленістю інвесторів, розвитком нових технологічних рішень, а також масштабуванням кількості виробництв.

Звичайно необхідно продовжувати примножувати отриманий успіх, але пропрацьовувати іноваційні рішення, які заглядають на декілька кроків в майбутнє є доцільно вже зараз. Тому наступним кроком розвитку сектору вбачається модернізацію вже існуючих біометанових заводів для підвищення їхньої комерціалізації та розширення асортименту продукції. Крім того, пошук нових технологічних рішень та переоцінка вже існуючого підходу до безвідходних виробництв приведе до підвищення їх «зеленої» складової через зменшення вуглецевого сліду виробництва.

					НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВСТУП	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Сидоренко М.Р.</i>						
<i>Перевір.</i>		<i>Стабніков В.П.</i>					8	136
<i>Реценз.</i>						Кафедра БТМ		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		<i>Стабніков В.П.</i>						

Особливістю біометанових виробництв є їхня інтеграційна здатність до ланцюгових технологій замкнутого циклу, що дозволяє створювати стійкі, екологічно безпечні та економічно вигідні енергетичні рішення. У таких системах побічні продукти можуть бути перероблені й використані повторно, що сприяє зменшенню відходів і підвищенню рентабельності (Vassì di Sarasì та ін., 2019).

Використання водоростей і ціанобактерій як біологічних агентів у біотехнологічних виробництвах, є новітнім напрямком, який може значно підвищити ефективність процесу. Ці мікроорганізми здатні поглинати вуглекислий газ, виробляти та накопичувати багато різних речовин, які мають практичну цінність, що робить їх ідеальними для інтеграції у ланцюгові технології (Pavičić, Novak Mavar, Brkić, Simon, 2022).

Інтеграція технологій виробництва цінних продуктів з водоростей та ціанобактерій на біометанових заводах сприятиме максимальному ефективному використанню економічного потенціалу водоростей та ціанобактерій, крім того, вона дозволить зменшити відходи виробництва. Це дозволить не лише збільшити вихід кінцевої продукції, але й оптимізувати використання наявних ресурсів.

РОЗДІЛ 1. ВОДРОСТІ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЇ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ

1.1 Анаеробне зброджування моносубстратів

Вибір потенційних видів водоростей чи ціанобактерій для досягнення інтегрованого та стійкого процесу є серйозною проблемою через великі відмінності у виході біометану при використанні біомаси водоростей різних видів (Zabed та ін., 2020).

При виробництві біогазу з водоростей та ціанобактерій є ряд складнощів, такі як низька біорозкладаємість сирової біомаси, низьке співвідношення вуглецю і азоту (C/N) в біомасі і накопичення летких жирних кислот в реакторі. Іншим ключовим обмеженням для їх анаеробного зброджування є ризик інгібування процесу аміаком, який вивільняється під час розкладання білків, амінокислот та нуклеїнових кислот (Solé-Bundó та ін., 2019). Тому при виборі біологічного агента необхідно звертати увагу на його біохімічний склад та співвідношення C/N.

Так, при отриманні біометану з біомаси *Spirulina platensis*, співвідношення C/N становило 4.4 (Aramgueang та ін., 2016), що вважається відносно низьким для процесу анаеробного зброджування. Крім того, високий вміст білка у складі біомаси призвів до високого рівня амонію при підвищенні швидкості завантаження органічних речовин до реактора та низького виходу біометану.

Для підвищення вмісту вуглеводів у біомасі ціанобактерії *Pseudanabaena* sp. проводили її культивування на середовищах з низьким вмістом нітрогену (Cuellar-Vermudez та ін., 2019). Але порівняння ефективності процесу анаеробного зброджування біомаси цих ціанобактерій показало, що вищий вихід біометану було отримано при використанні біомаси з низьким вмістом вуглеводів (23%), ніж при зброджуванні біомаси, що містила 69% вуглеводів.

					НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ			
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1. ВОДРОСТІ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЇ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Сидоренко М.Р.					10	136
Перевір.		Стабніков В.П.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Стабніков В.П.				Кафедра БТМ		

У комплексному дослідженні було розглянуто питання анаеробного зброджування біомаси водоростей *Chlorella* sp. MA10 та нанопланктонних ціанобактерій *Microcystis* sp. UTEX B2678 вирощених на поживному середовищі з рідкою фазою дигістату з біогазової установки (Kisielewska та ін., 2023). Було встановлено, що кумулятивний вихід біометану був найвищими для біомаси *Chlorella* sp. Це дало підставу зробити висновок що склад клітинної стінки водоростей має більший вплив на вихід біогазу та біометану чим низьке співвідношення C/N, яке коливалося від 8,5 до 10,95.

При анаеробному зброджуванні біомаси водоростей *Chlamydomonas reinhardtii* CC-1690 вирощених на побутових стічних водах було відмічено, що надзвичайна толерантність до підвищених температур, дуже сильного освітлення та мікробного забруднення, призвели до високого накопичення біомаси з хорошим біохімічним складом на рівні 3,1 г/л за 5 діб (Klassen та ін., 2020). При використанні цієї біомаси спостерігали високий вихід біометану при співвідношенні C/N 25,8. При цьому, цей результат був отриманий без будь-якої попередньої обробки біомаси.

Біомасу для виробництва біометану отримували вирощуванням консорціума, що складався з *Chlorella pyrenoidosa* та *Phormidium* sp. в біоплівковому фотобіореакторі на відкритому повітрі на побутових стічних водах без використання зовнішньої енергії (Naaz та ін., 2019). При проведенні анаеробного зброджування біомаси спостерігався високий кумулятивний вихід біометану 345 мл/г сухих органічних речовин (COP), в той час як теоретичне виробництво метану, розраховане для біомаси *C. pyrenoidosa* та *Phormidium* sp., становило 504 мл/г COP та 591мл/г COP відповідно.

Проблема низької ефективності анаеробного зброджування клітинної стінки водоростей була розглянута у роботі Debowski та ін. (2023). Для дезінтеграції клітин водоростей *Scenedesmus* sp. була застосована ультразвукова обробка біомаси протягом 150–200 секунд, що дозволило досягти максимального виходу метану 313 мл CH₄/г COP.

Попередня обробка біомаси водоростей *Chlorella vulgaris* при температурі 85°C призвела до збільшення виходу біометану на 25% у процесі анаеробного зброджування (Damtie та ін., 2021). Характеристика анаеробного зброджування водоростей та ціанобактерій наведена у Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Характеристика анаеробного зброджування водоростей та ціанобактерій

Субстрат	Біохімічний склад клітини, %	Кумулятивний вихід метану, мл CH ₄ / г СОР	Тривалість процесу, днів	Температура проведення процесу, °С	Література
<i>Spirulina platensis</i>	Вуглеводи – 20,0 Білки – 67,5 Ліпіди – 3,05 Зола – 8,51	342,0	15	35	Aramrueang та ін., 2016
<i>Pseudanabaena</i> sp. СУ14-1	Вуглеводи – 23,0	251,0	29	35	Cuellar-Bermudez та ін., 2019.
<i>Chlorella</i> sp. MA10	Вуглеводи – 39,77 Білки – 27,11 Ліпіди – 14,19	220,5	20	35	Kisielewska та ін., 2023
<i>Microcystis</i> sp. UTEX В 2678	Вуглеводи – 41,38 Білки – 36,29 Ліпіди – 7,38	241,3	20	35	
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> CC-1690	Білки – 20,2 Ліпіди – 21	478,0	18	35	Klassen та ін., 2020
<i>Phormidium</i> sp.	Вуглеводи – 13,1 Білки – 18,75 Ліпіди – 35,2 Зола – 15,2	346,6	30	37	Naaz та ін., 2019
<i>Scenedesmus</i> sp.	Вуглеводи – 36,8 Білки – 27,5 Ліпіди – 16,3	313,0	40	37	Dębowski та ін., 2023
<i>Chlorella vulgaris</i>	Вуглеводи – 35,3 Білки – 26,8 Ліпіди – 0,7	239,9	35	35	Damtie та ін., 2021

Вихід метану при анаеробному зброджуванні рослинної сировини, наприклад силосу та сіна становить 286–319 мл/г СОР (Luna-delRisco та ін., 2011).

Отже, спираючись на дані табл. 1.1 можна зробити висновки, що для більшості водоростей та ціанобактерій кумулятивний вихід біометану знаходиться на рівні рослинної сировини. Крім того, більшість водоростей потребують попередньої обробки біомаси, можливо інгібування амонієм процесу анаеробного зброджування через великий вміст білку в їх складі, що призводить до зменшення виходу біометану. Найбільш перспективними в цьому плані виглядають водорості *Chlamydomonas reinhardtii* CC-1690, які показали найвищий вихід метану без потреби в попередній обробці.

1.2 Анаеробне зброджування залишків біомаси водоростей та ціанобактерій після виділення практично цінних продуктів

Залишки біомаси водоростей та ціанобактерій, отримані після виробництва біопалива, можуть бути використані для виробництва біогазу. Такий інтегрований підхід мінімізує витрати та електроенергію, які необхідні для вирощування та збирання біомаси водоростей та ціанобактерій (Torres та ін., 2023). Ці залишки мають кращі характеристики для процесу анаеробного зброджування та вищий вихід біометану в порівнянні з необробленими водоростями та ціанобактеріями, оскільки етап виділення цінних продуктів одночасно є попередньою обробкою для них (Markou та ін., 2022).

Комплексне дослідження проведене (Torres та ін. (2023) демонструє, що залишки біомаси *Chlorella* sp., *Nannochloropsis* sp. та *Scenedesmus* sp. після виділення ліпідів для виробництва біодизеля мали майже такий самий вихід біометану як і необроблені водорості. Якщо до цих показників додати кількість метану, що утворився при анаеробному зброджуванні залишків водоростей після їх трансестерефікації, то вихід біометану буде значно більшим, ніж у необроблених водоростей. Процес отримання біодизелю відбувався з використанням метанолу як розчинника та сірчаної кислоти як кислотного каталізатора.

Показано, що при використанні залишків біомаси *Chlorella vulgaris* після виділення білків, хлорофілу та ліпідів можна отримати приблизно однаковий вихід

біометану в порівнянні з необробленими водоростям (Markou та ін., 2022). Білки виділяли за допомогою кип'ятіння біомаси протягом 1 год з додаванням розчину 0,5 М NaOH. Екстракцію ліпідів проводили за допомогою метода Фолча з використанням суміші хлороформ/метанол/вода в об'ємному співвідношенні 8:4:3. Виділення хлорофілу проводили шляхом додавання метанолу та прогрівання суміші при 70°C протягом 20 хв. Автори дійшли висновку, що вибір відповідних методів виділення цінних сполук є дуже важливим і може негативно впливати на процес анаеробного зброджування, як у випадку з хлороформом після виділення ліпідів.

В роботі Lee та ін. (2017) було підтверджено, що вихід біометану з залишків біомаси *Hydrodictyon reticulatum* після виробництва біоетанолу був у 3,15 рази більший, ніж у необроблених водоростей.

Результати досліджень Varontini та ін. (2016) також доводять, що з залишків біомаси *Nannochloropsis gaditana* після виділення ліпідів за допомогою метода Сокслета з використанням н-гексану та етанолу в співвідношенні 3:1 можна отримати вищий вихід біометану, ніж при анаеробному зброджуванні необроблених водоростей. При цьому співвідношення C/N залишків біомаси становило 6.

Показано, що залишки біомаси ціанобактерії *Spirulina platensis* після екстракції ліпідів за допомогою суміші хлороформ/метанол у об'ємному співвідношенні 1:2 можна використовувати як сировину для виробництва біометану (Sumprasit та ін., 2017). Отримані показники для залишків біомаси були трохи вищими, ніж для необробленої біомаси. При цьому отриманий біогаз мав частку біометану 67.9%, що є високим показником для цього виду субстрату.

Характеристика анаеробного зброджування залишків біомаси водоростей та ціанобактерій наведена у Таблиці 1.2.

Характеристика анаеробного збродження залишків біомаси водоростей та ціанобактерій

Субстрат	Біохімічний (Елементний) склад, %	Кумулятивний вихід метану, мл СН ₄ / г СОР	Тривалість процесу, днів	Температура проведення процесу, °С	Література
Залишки біомаси <i>Chlorella sp.</i> після виділення ліпідів	С – 46,14 N – 14,14 H – 6,53 O – 33,19	344,19	40	31,5	Torres та ін., 2023
Залишки біомаси <i>Nannochloropsis sp</i> після виділення ліпідів	С – 37,57 N – 10,19 H – 5,47 O – 46,77	344,1	40	31,5	
Залишки біомаси <i>Scenedesmus sp</i> після виділення ліпідів	С – 45,49 N – 8,61 H – 6,59 O – 39,31	298,49	40	31,5	
Залишки біомаси <i>Chlorella vulgaris</i> після виділення білків	Вуглеводи – 14,36 Білки – 17,8 Ліпіди – 20,68	207	35	35	Markou та ін., 2022
Залишки біомаси <i>Chlorella vulgaris</i> після виділення хлорофілу	Вуглеводи – 12,04 Білки – 51,3 Ліпіди – 5,43	210	35	35	
Залишки біомаси <i>Chlorella vulgaris</i> після виділення ліпідів	Вуглеводи – 8,29 Білки – 57,8 Ліпіди – 1,48	219	35	35	
Залишки біомаси <i>Hydrodictyon reticulatum</i> після виробництва біоетанолу	-	465,5	32	35	Lee та ін., 2017
Залишки біомаси <i>Nannochloropsis gaditana</i> після виділення ліпідів	С – 54,9 N – 9,2 H – 7,3	288,9	30	37	Barontini та ін., 2016
Залишки біомаси <i>Spirulina Platensis</i> після виділення ліпідів	-	290	30	37	Sumprasit та ін., 2017

Можна дійти висновку, що використання для анаеробного зброджування залишків біомаси водоростей та ціанобактерій після видалення з них практично цінних продуктів має переваги над застосуванням безпосередньо сирової біомаси. Виділення ліпідів, білків та хлорофілу з біомаси водоростей та ціанобактерій є фактично її попередньою обробкою, яка забезпечує підвищення виходу біометану. Серед наведених представників увагу привертають залишки біомаси прісноводної колоніальної зеленої водорості *Hydrodictyon reticulatum* після виробництва біоетанолу.

1.3 Анаеробне зброджування зі змішуванням субстратів

Анаеробне зброджування зі змішуванням субстратів є одним з найкращих способів вирішення проблем, які виникають під час анаеробного зброджування моносубстратів (Vargas-Estrada та ін., 2022). Крім того, воно економічно доцільніше та є більш продуктивним за виходом біометану за рахунок приведення показників субстрату до оптимальних умов. Ще однією перевагою цього способу є його низька собівартість в порівнянні із застосуванням попередньої обробки (Solé-Bundó та ін., 2017).

Дослідження по анаеробному зброджуванню штучних харчових відходів, які складались з рису (20%), квасолі (20%), м'яса (15%), салату (25%), моркви (10%) та помідорів (10%), та консорціуму водоростей *Dictyosphaerium* sp. показало, що змішування субстратів призвело до більшого виходу CH_4 на 21% та 55%, ніж тільки від харчових відходів або лише водоростей відповідно (Ferreira та ін., 2021).

Анаеробне зброджування суміші біомаси водоростей *Tribonema* sp. та свинячого гною підвищувало вихід метану на 17% в порівнянні зі звичайним свинячим гноєм. Отриманий дигістат від процесу анаеробного зброджування продемонстрував такий самий вихід біомаси, що і класичне середовище BG-11, тобто він є придатним до використання компонентом поживного середовища (Hu та ін., 2021).

При зброджування суміші водоростей *Scenedesmus* sp. та *Chlorella* sp. з харчовими відходами вихід біометану був в 5 разів вищий, ніж при зброджуванні тільки водоростей (Zhen та ін., 2016).

При анаеробному зброджуванні суміші біомаси ціанобактерій *Spirulina platensis*, вирощених на стічних водах молочної промисловості, з гноєм великої рогатої худоби (ВРХ) вихід біометану був в 1,6 разів вище у порівнянні з використанням термічно обробленої при 120 °С біомаси *Spirulina platensis* та в 2,5 рази більше в порівнянні з гноєм ВРХ (Álvarez та ін., 2020).

Практичну цінність має дослідження проведене Deže та ін. (2020). У цій роботі провели порівняння анаеробного зброджування зі змішуванням біомаси водоростей та гною ВРХ і біомаси ціанобактерій та гною ВРХ. Варіант з використанням водоростів мав трохи більший вихід біометану на г сухих органічних речовин, ніж ціанобактерій, але при цьому об'ємна частка метану в біогазі була однаковою і становила 64%.

Особливу увагу привертає робота Astals та ін. (2015), в якій було досліджено зброджування 85% гною свиней до 15% залишків біомаси *Scenedesmus* sp. після екстракції ліпідів та білків. Кумулятивний вихід біометану в таких умовах був кращим, ніж для біомаси водоростей, і становив 300 мл СН₄/г СОР. Ця технологія має великі перспективи у безвідходних виробництва та забезпеченні циклічної економіки.

Робота Solé-Bundó та ін. (2017) демонструє, що змішування біомаси *Chlorella* sp. та *Monoraphidium* sp., вирощених на побутових стічних водах, та попередньо обробленої соломи пшениці в якості субстрату для анаеробного зброджування підвищує вихід біометану на 77% в порівнянні з окремим зброджуванням тільки біомаси та тільки соломи. Попередня обробка при температурі 72°C з додавання СаО збільшила вихід біометану тільки на 15%.

Характеристика анаеробного зброджування змішаних субстратів наведена у Таблиці 1.3.

Характеристика анаеробного зброджування змішаних субстратів

Назва субстратів для анаеробного зброджування	Співвідношення субстрату до біомаси	Кумулятивний вихід метану, мл CH ₄ /г СОР	Тривалість процесу, днів	Температура проведення процесу, °С	Література
Харчові відходи + біомаса <i>Dictyosphaerium</i> sp.	3:1	514,0	50	35	Ferreira та ін., 2021
Свинячий гній + біомаса <i>Tribonema</i> sp.	4:1	580,0	40	35	Hu та ін., 2021
Харчові відходи + біомаса <i>Scenedesmus</i> sp. та <i>Chlorella</i> sp.	4:1	639,0	40	35	Zhen та ін., 2016
Гній ВРХ + біомаса <i>Spirulina platensis</i> , вирощена на стічних водах молочної промисловості	5,6:1	482,5	40	35	Álvarez та ін., 2020
Гній ВРХ + біомаса водоростей з ставка	19:1	296,6	42	55	Deže та ін., 2020
Гній ВРХ + біомаса <i>Lyngbya</i> sp.		245,6	42	55	
Гній свиней + залишки біомаси <i>Scenedesmus</i> sp.	5,7:1	300,0	50	37	Astals та ін., 2015
Біомаса <i>Chlorella</i> sp. та <i>Monoraphidium</i> sp., вирощені на побутових стічних водах + солома пшениці	1:4	315,0	37	40	Solé-Bundó та ін., 2017

Отже, змішування субстратів має найбільше перспектив до застосування, через вирішення проблем анаеробного зброджування лише однієї біомаси або залишків біомаси. Серед наведених субстратів найвищий вихід біометану було отримано при використанні харчових відходів та біомаси зелених водоростей *Scenedesmus* sp. та *Chlorella* sp., 639 мл CH₄/г СОР (Zhen та ін., 2016) та харчових відходів та біомаси зелених водоростей *Dictyosphaerium* sp. - 514 мл CH₄/г СОР (Ferreira та ін., 2021).

РОЗДІЛ 2. ВИРОБНИЦТВО ПРОВІДНОГО БІОДИЗЕЛЯ З ВОДОРОСТЕЙ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЙ

2.1 Огляд технологій трансестерифікації біомаси та ліпідів

Виробництво біодизеля з біомаси водоростей є провідною технологією отримання екологічного та економічно життєздатного палива. Ключовим етапом цього процесу є трансестерифікація ліпідів у метилові або етилові ефіри жирних кислот (De Jesus та ін., 2020). Проте промислове впровадження цієї технології стикається з труднощами, зокрема варіативністю ліпідного складу біомаси, складністю екстракції та чутливістю реакції до домішок води й вільних жирних кислот (Sivaramakrishnan та Incharoensakdi, 2017).

Вибір оптимального каталізатора, розчинника та умов процесу визначає не лише вихід продукту, а й економічну доцільність і безпеку виробництва. Тому розробка ефективних нових технологій в цьому напрямку є критичним аспектом комерціалізації біодизелю з водоростей та ціанобактерій. У дослідженні (Kim та ін., 2017) проводили оптимізацію технології отримання біодизелю з біомаси *Nannochloropsis gaditana* із застосуванням хлороформу та H_2SO_4 . Було встановлено, що підвищення температури реакції до $170^\circ C$ та часу утримання дозволяє зменшити необхідну кількість H_2SO_4 з 26,7% до 0,58% (об/об), а також повністю відмовитись від додаткового розчинника, що в цілому мало позитивний ефект на економіку цієї методики.

Цікавою виглядає робота De Jesus та ін. (2020), де було розглянуто процес прямої трансестерифікації біомаси *Chlorella pyrenoidosa* з використанням екологічно безпечних розчинників. Заміна класичного хлороформу на циклопентилметиловий ефір забезпечила високий вихід біодизелю на рівні 92%, а також отриманий біодизель повністю відповідав стандартам ASTM D6751 та EN 14214.

НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ

Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Сидоренко М.Р.			РОЗДІЛ 2. ВИРОБНИЦТВО ПРОВІДНОГО БІОДИЗЕЛЯ З ВОДОРОСТЕЙ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЙ	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Стабніков В.П.					19	136
Реценз.						Кафедра БТМ		
Н. Контр.								
Затверд.		Стабніков В.П.						

Крім того, було встановлено, що підвищення температури реакції понад 80°C не мало жодного ефекту на кінцевий вихід продукту, вирішальне значення мало підбір розчинника та каталізатора.

А в іншому дослідженні (Abomohra та ін., 2021) з використанням біомаси *Chlorella pyrenoidosa* FACHB9 було продемонстровано унікальний підхід до процесу прямої трансестерифікації. Вологу біомасу змішували з кавовою гущею для покращення виходу та якості біодизелю. Встановлено, що такий підхід дещо знижує вихід біодизелю, але збільшує показники його якості.

Sivaramakrishnan та ін Incharoensakdi (2017) порівняли процес прямої та двостадійної трансестерифікації для біомаси *Chlorella* sp. та *Scenedesmus* sp. В результаті було встановлено, що вихід біодизелю був схожий і становив 96% та 95% відповідно, але технологія прямої етерифікації потребує менше ресурсів та енергії, через відсутність додаткової стадії екстракції ліпідів. Отриманий в такі способи біодизель для обох видів біомаси повністю відповідав вимогам ASTM D6751.

Javed та ін. (2023) розробили мікробульбашкову технологію, яка інтенсифікує масообмін під час реакції етерифікації, яка була випробувана на ліпідах отриманих з біомаси *Chlorella vulgaris*. За допомогою цієї технології можна досягнути 92% виходу біодизеля впродовж 30 хв. Цей результат вдалось отримати з використанням гетерогенного каталізатора на основі метал-органічних каркасів, які були модифіковані рідиною [HMIM][HSO₄]/Bio-MOF. Каталізатор продемонстрував високу стабільність та можливість повторного використання без значної втрати активності.

Mittal та ін. (2023) продемонстрували технологію виробництва біодизелю з біомаси *Spirulina* sp. за допомогою нано-каталізатора (Ca(OCH₃)₂), який отримали методом вологого імпрегнування. Він мав діаметр 50 нм, але його площа поверхні сягала 27,06 м²/г. Проведена оптимізація параметрів реакції дозволила досягнути виходу біодизелю 99% за 3 години. Цей каталізатор показав стабільну роботу, і зберігав активність протягом 5 циклів використання, що робить його перспективним для промислового застосування.

В дослідженні Sanjurjo та ін. (2024) використали метоксид натрію CH_3ONa в якості каталізатора для отримання біодизелю з біомаси водоростей *Nannochloropsis gaditana*. Хоча вихід біодизелю був трохи нижчий за середній згаданий, але низька температура та короткий час реакції робить процес енергоефективними. Проте, через велику кількість подвійних зв'язків у ланцюгах жирних кислот, окислювальна стабільність кінцевого біодизелю є низькою.

У роботі (Parthiban та Jambulingam, 2023) описане використання класичного методу трансестерефікації ліпідів з біомаси ціанобактерій *Synechococcus elongatus* та *Anabaena* sp. отриманих методом Фолча. Хоча в роботі не зазначили вихід біодизелю, зате провели детальний аналіз цього палива на відповідність критеріям EN 14214 та ANP255. Отримані результати свідчать, що біодизель не повністю відповідає цим стандартам, але може бути застосований як паливо (Таблиця 2.1).

Таблиця 2.1

Аналіз інновацій в процесі трансестерефікації

Сировина для виробництва	Розчинник	Каталізатор	Умови проведення	Вихід біодизелю, %	Література
<i>Nannochloropsis gaditana</i>	Хлороформ	H_2SO_4	t = 170°C T = 120 хв H_2SO_4 – 0,58% (об/об)	92,2	Kim та ін., 2017
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Метанол	Циклопентилметиловий ефір та HCl	t = 80°C метанол:ЦПМЕ:Н Cl – 10:1:1 T = 150 хв n = 380 об/хв	92	De Jesus та ін., 2020
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> FACHB9	Етанол, 2-дихлоретан	-	t = 198°C T = 132 хв етанол:2-дихлоретан – 1:1	20,15	Abomohra та ін., 2021
<i>Chlorella</i> sp	Метанол, Гексан	NaOH	t = 60°C T = 180 хв n = 300 об/хв гексан:біомаса – 20:1	96	Sivaramkrishnan, та Incharoensakdi, 2017
<i>Scenedesmus</i> sp.	Метанол, Гексан	NaOH	t = 60°C T = 180 хв n = 300 об/хв гексан:біомаса – 20:1	92	

Закінчення табл. 2.1

<i>Chlorella vulgaris</i>	Метанол	[HMIM][HSO ₄]/Bio-MOF	t = 70°C T = 30 хв Метанол:ліпіди – 15:1	92	Javed та ін., 2023
<i>Spirulina</i> sp.	Метанол	(Ca(OCH ₃) ₂)	t = 80°C T = 180 хв Метанол:ліпіди – 30:1	99	Mittal та ін., 2023
<i>Nannochloropsis gaditana</i>	Гексан	CH ₃ ONa	t = 50°C T = 75 хв Метанол:ліпіди – 12:1	87,25	Sanjurjo та ін., 2024
<i>Synechococcus elongatus</i>	Метанол	KOH	t = 55°C T = 180 хв Метанол:ліпіди – 6:1	-	Parthiban та Jambulingam, 2023
<i>Anabaena</i> sp.	Метанол	KOH	t = 55°C T = 180 хв Метанол:ліпіди – 6:1	-	

З викладеної вище інформації можна зробити висновок, що цей напрямок активно досліджується та вдосконалюється. Вихід біодизеля більше залежить від обраних розчинників та каталізаторів, ніж від виду та роду водоростей або ціанобактерій.

РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ ІНТЕГРАЦІЇ ВОДРОСТЕЙ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЙ НА БІОМЕТАНОВИХ ЗАВОДАХ

3.1 Вирощування водоростей та ціанобактерій на дигестаті

Утилізація дигестату, отриманого після анаеробного зброджування, стикається з екологічними викликами. Хоча його широко застосовують як органічне добриво для деградованих земель, але його використання строго регулюється через можливість перенасичення землі (Panday, Bhusal, Das, Ghalehgholabbehbahani, 2024).

Використання дигестату як компонента поживного середовища для вирощування водоростей та ціанобактерій є дуже перспективним. Такий процес забезпечить циклічність виробництва біометану, оскільки водорості можна повторно використати для отримання біогазу (Kisielewska та ін., 2020).

У дослідженні (Zhu та ін., 2019) розглядали культивування *Chlorella vulgaris* NIES-22 на нестерильній рідкій фракції дигестату з гною ВРХ. Вчені зазначили, що дигестат потребує розведення дистильованою водою, через високу концентрацію амонію, який є згубним для водоростей. Дослідним шляхом було встановлено, що концентрація дигестату 25% демонструє найкращі результати по продуктивності біомаси, яка становила 350,8 мг/л/день, та ступеню видалення амонію та фосфору, які становили майже 100%, що свідчить про ефективність цього субстрату, як компонента поживного середовища.

Проведене дослідження (González-González, Eltanahy, Schenk, 2019) демонструє ефективність використання рідкої фракції дигестату в порівнянні з використанням твердої фракції, яка забезпечувала повільне вивільнення поживних речовин. Рідкий дигестат, розбавлений у співвідношенні 1:18, забезпечував більший вихід біомаси *Chaetoceros muelleri* CS-176. Використання рідкого дигестату також дозволило досягти швидшого споживання амонію 38% та фосфатів 50% із середовища.

					НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ			
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Сидоренко М.Р.			РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ ІНТЕГРАЦІЇ ВОДРОСТЕЙ ТА ЦІАНОБАКТЕРІЙ НА БІОМЕТАНОВИХ ЗАВОДАХ	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Стабніков В.П.					23	136
Реценз.						Кафедра БТМ		
Н. Контр.								
Затверд.		Стабніков В.П.						

Дослідники (Wang, Higgins, Ji, Zhao, 2018) зазначають, що використання рідкої фракції дигестату має певні обмеження через великий вміст інгібуючих речовин. Типовим є розведення дигестату водою, але коефіцієнт розведення зазвичай становить 10 - 30 разів, тому видалення інгібіторів шляхом попередньої обробки є більш екологічним.

Група вчених (Zhou та ін., 2019) розробили інноваційний метод попередньої обробки дигестату з свинячого гною за допомогою комбінованого флокуляційно-біологічного контактного окислення (F-BCO). Цей метод ефективно видаляє важкі метали до 93% для Cu, а також зменшує концентрацію амонію на 46%, що зробило дигестат придатним для культивування *Chlorella sp. M-12*. Крім того, він також зменшив кольоровість середовища на 50% та знизив вміст суспендованих часток на 91%, що сприяло фотосинтезу та дозволило отримати добову продуктивність 0,34 г/л/день.

У своєму дослідженні (Qin та ін, 2021) продемонстрували перспективу застосування біологічного аерованого фільтра (BAF) для попередньої обробки рідкого дигестату з молочної промисловості. Вони встановили, що така обробка усуває аміачне інгібування та підвищує світлопроникність середовища до 260%, що сприяло зростанню водорості *Chlorella pyrenoidosa* 15-2070. Цей метод дозволив зменшити витрати в порівнянні з традиційними методами попередньої обробки.

Науковці (Thi Nguyen, Lin, Lay, 2019) досліджували культивування водоростей *Scenedesmus sp.* із використанням біогазу та дигестату з текстильних стічних вод. Перед культивуванням дигестат проходив попередню обробку центрифугуванням при 9000 об/хв протягом 15 хвилин для видалення нерозчинних часток. Вона забезпечила при культивуванні концентрацію біомаси на рівні 1,79 г/л та вловлювання CO₂ на рівні 98,2% за 10 днів.

Інші дослідники (Tao, Lakaniemi, Rintala, 2017) дослідили вплив термічної попередньої обробки нерозбавленого дигестату при 121°C протягом 10 хв на культивування *Scenedesmus acuminatus* SAG 38.81. Отримані результати свідчать, про ефективність даного процесу. Крім того, дослідники встановили, що на

дигестаті, який отриманий при термофільних умовах можна отримати більший вихід біомаси 10,8 г/л, ніж для мезофільних умов 7,8 г/л.

Команда вчених (Jiang та ін., 2018) запропонувала альтернативний метод попередньої обробки дигестату з свинячого гною. Вони використовували стувіт-преципітацію, що призвело до збільшення прозорості середовища до 80%. Крім того, на обробленому дигестаті вдалось досягти добової продуктивності водоростей *Dictyosphaerium ehrenbergianum* FACHB-1223 161,06 мг/л/день при цьому ефективність споживання азоту становила 93% Ці результати значно перевищували показники отримані на стандартному середовищі BG-11.

У роботі (Simonazzi та ін., 2019) було досліджено іншу попередню обробку дигестату, яка складалась з фільтрації та центрифугування. Ця обробка створила поживне середовище з високою прозорістю, що сприяло високому показнику споживання нітратів 98% та повному споживанню фосфатів за 7 днів. Добова продуктивність склала 0,075 г/л/день у закритому фотобіореакторі, що було на 100% ефективніше, ніж для відкритих фотобіореакторів. Крім того, отримана біомаса *Phaeodactylum tricorutum* PTN0301 мала менший вміст білку до 24% та більший вміст ліпідів 37%.

Науковці (Sánchez-Quinterota ін., 2023) довели ефективність використання активованого вугілля для попередньої обробки дигестату. Концентрація вугілля 50 г/л призвело до зменшення хімічного споживання кисню на 54,7%, концентрації фосфору на 50% та фенолів на 84,7%. Це очищення не мало негативного впливу на процес культивування ціанобактерій *Spirulina platensis* та дозволило отримати концентрацію біомаси 0,93 г/л.

Цікавою виглядає робота (Koutra, Kopsahelis, Maltezou, Grammatikopoulos, Kornaros, 2019), де вивчалось питання органічного та мінерального збагачення дигестату для вирощування водоростей *Parachlorella kessleri*. Найкращі результати було отримано при додаванні молочної сироватки, яка дозволила отримати концентрацію біомаси 2,68 г/л за 18 днів, у порівнянні з 0,86 г/л для чистого дигестату. Також вчені відмітили, що додавання 0,5 г/л MgSO₄ до дигестату

підвищило вихід біомаси до 1,18 г/л лише за 6 днів. Це свідчить про критичну роль магнію як елемента для оптимального росту.

Таблиця 3.1

Використання дигестату для культивування водоростей та ціанобактерій

Біологічний агент	Походження дигестату	Характеристика дигестату, мг/л	Умови культивування	Концентрація біомаси, г/л	Джерело
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> 15-2070	Рідка фракція дигестату з гною ВРХ	РХК – 1550 ЗР – 86 ЗН – 672 ЗNH ₃ – 668	w = 2% CO ₂ E = 200 μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ t = 25°C τ = 6 днів pH = 9,0	1,74	Qin та ін., 2021
<i>Chlorella sorokiniana</i> UTEX 2805	Рідка фракція дигестату з побутових стоків	-	Q = 150 мл/хв w = 2% CO ₂ E = 135 μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ t = 25°C τ = 5 днів pH = 9,0	0,6	Wang, Higgins, Ji, Zhao, 2018
<i>Chlorella vulgaris</i> NIES-22	Рідка фракція дигестату з гною ВРХ	РХК – 700 ЗР – 40 ЗН – 280 ЗNH ₃ – 270	Q = 0,3 об/об/хв w = 3% CO ₂ E = 200 μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ t = 25°C τ = 7 днів pH = 8	2,8	Zhu та ін., 2019
<i>Chlorella sp. M-12</i>	Рідка фракція дигестату з свинячого гною	РХК – 591 ЗР – 8,4 ЗNH ₃ – 299	E = 140 μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ Фотоперіод = 16:8 t = 26°C τ = 15 днів pH = 8	3,3	Zhou та ін., 2019

<i>Scenedesmus sp.</i>	Рідка фракція дигестату з стічних вод текстильної промисловості	COP – 300 PXK – 500	$Q = 0.0026$ об/об/хв $w = 23\% \text{ CO}_2$ $n = 300$ об/хв $I = 11000$ Люкс $t = 25^\circ\text{C}$ $\tau = 10$ днів $\text{pH} = 7,5$	1,79	Thi Nguyen, Lin, Lay, 2019
<i>Scenedesmus acuminatus</i> SAG 38.81	Дигестат з целюлозно-паперового шламу	POP – 540 PHP – 690 PXK – 2000 ЗР – 27 ЗNH ₃ – 480 N:P – 17,6 ЗS ⁻ – 15	$Q = 0,105$ л/хв $w = 5\% \text{ CO}_2$ $E = 240$ μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ $t = 22^\circ\text{C}$ $\tau = 21$ день $\text{pH} = 8,0$	10,8	ТАО, Lakaniemi, Rintala, 2017
<i>Scenedesmus sp.</i> EE101	Рідка фракція дигестату з 15% кукурудзяного силосу, 80% водоростів та 5% гною ВРХ	PXK – 1040 ЗР – 18,2 ЗN – 232 ЗNH ₃ – 164	$Q = 250$ л/год $I = 700$ люкс $t = 22^\circ\text{C}$ $\tau = 10$ днів $\text{pH} = 7,2$	2,36	Kisielewska та ін., 2020
<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i> FACHB-1223	Рідка фракція дигестату з свинячого гною	-	$Q = 0,2$ л/хв $E = 50$ μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ Фотоперіод = 12:2 $t = 25^\circ\text{C}$ $\tau = 10$ днів $\text{pH} = 8$	1,61	Jiang та ін., 2018
<i>Phaeodactylum tricorutum</i> PTN0301	Рідка фракція дигестату з сільськогосподарських відходів	POP – 150 PXK – 36,7 ЗР – 7 ЗN – 29	$Q = 0.6$ об/об/день $E = 100$ μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ Фотоперіод = 16:8 $t = 20^\circ\text{C}$ $\tau = 16$ днів $\text{pH} = 8,7$	1,2	Simonazzi та ін., 2019

<i>Chaetoceros muelleri</i> CS-176	Рідка фракція дигестату з залишків біомаси <i>Chaetoceros muelleri</i> після екстракції ліпідів	POP – 544 РХК – 1098 ЗР – 261,41 ЗН – 874,11 ЗNH ₃ – 381,90	$E = 300 \mu\text{моль фотон м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $t = 28^\circ\text{C}$ $\tau = 7 \text{ днів}$ $\text{pH} = 7,0$	3,4	González-González, Eltanahy, Schenk, 2019
<i>Spirulina platensis</i>	Рідка фракція дигестату з сільськогосподарських залишків, гною та харчових відходів	РХК – 144 ЗNH ₃ – 74 ЗР – 14	$Q = 1 \text{ л/хв}$ $E = 60 \mu\text{моль фотон м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $t = 25^\circ\text{C}$ $\tau = 10 \text{ днів}$ $\text{pH} = 8,5$	0,93	Sánchez-Quinterota ін., 2023
<i>Parachlorella kessleri</i>	Рідка фракція дигестату з агровідходів, свинячим, коров'ячим та курячим гноєм, сироваткою та відходами боєнь	POP – 434 РХК – 10693 ЗР – 142 ЗН – 3873 ЗNH ₃ – 3668	$n = 250 \text{ об/хв}$ $Q = 0,5 \text{ л/хв}$ $E = 370 \mu\text{моль фотон м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $t = 25^\circ\text{C}$ $\tau = 18 \text{ днів}$ $\text{pH} = 8,0$	2,68	Koutra, Kopsahelis, Maltezos, Grammatikopoulos, Kornaros, 2019
<i>Desmodesmus sp.</i>	Рідка фракція дигестату з целюлозно-паперового шламу	ЛЖК – 840 РХК – 3200 ЗNH ₃ – 195	$n = 120 \text{ об/хв}$ $E = 80 \mu\text{моль фотон м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $t = 25^\circ\text{C}$ $\tau = 15 \text{ день}$	1,31	Mohammad khani, Mahboubi, Plöhn, Funk, Ylittervo, 2024
<i>Chlorococcum sp.</i> MC-1				1,82	
<i>Scotiellopsis reticulata</i> UFA-2				1,05	
<i>Coelastrella sp.</i>				1,99	
<i>Monoraphidium sp.</i>	Рідка фракція дигестату з гною тварин та залишків рослинних культур	СОР – 470 РХК – 239 ЗР – 16,1 ЗН – 216 ЗNH ₃ – 121	Сонячне освітлення $t = 14 - 25^\circ\text{C}$ $\tau = 10 \text{ днів}$ $\text{pH} = 7,5$	0,77	Jimenez та ін., 2020
Консорціум водоростей та ціанобактерій	Дигестат з очисної установки стічних вод комунального та промислового походження	Амоній – 1130 Нітрати – 41,3 Фосфати – 73,98 Сульфати – 32,98	$Q = 0,3 \text{ л/хв}$ $I = 4000 \text{ люкс}$ $t = 25^\circ\text{C}$ $\tau = 8 \text{ днів}$ $\text{pH} = 9,0$	0,65	PolICASTRO, Cesaro, Fabbicino, Pirozzi, 2022

Змішана культура <i>Chlorella vulgaris</i> та <i>Scenedesmus armatus</i>	Дигестат з твердих побутових відходів (50%), гною ВРХ (17%), промивної води (8%), прострочених ринкових продуктів (4%) та курячий послід (4%)	-	$n = 130$ об/хв $E = 150$ $\mu\text{моль}$ фотон $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ $t = 25^\circ\text{C}$ $\tau = 18$ днів	1,45	Ermis, Altınbaş, 2020
--	---	---	---	------	-----------------------------

Отже, водорості та ціанобактерії демонструють хороші показники при вирощуванні на дигестаті. Наразі є багато методів попередньої обробки цього субстрату серед найкращих та перспективних теплова обробка, біологічного аеровані фільтри та флокуляційно-біологічне контактне окислення. Серед всіх представників водоростей та ціанобактерій особливу увагу привертають *Scenedesmus acuminatus* SAG 38.81 через найвищі показники концентрації біомаси.

3.2 Використання водоростей та ціанобактерій для покращення якості біогазу

Традиційні методи фізичного та хімічного очищення все ще залишаються високоенергоємними та хімічно інтенсивними, що призводить до високої собівартості біометану та швидкого зношування обладнання. Наразі все більше науковців звертають свою увагу на дослідження питання підвищення якості біогазу за рахунок використання біотехнологічних методів, які є більш стійкими економічному та екологічному плані (Kikuchi, Kanai, Sugiyama, Fujii, 2024).

Найперспективнішим з них є культивування водоростей та ціанобактерій на CO_2 , який міститься в біогазі. Ця технологія дозволяє не тільки збільшити частку CH_4 та зменшити вміст CO_2 , але й зменшити вміст H_2S та H_2O , які є головними джерелами виникнення корозії обладнання (Leiton, Brenes, Uribe-Lorío, 2019).

У своїй роботі (Shen та ін., 2020) використовували водорості *Chlorella vulgaris*, який культивували на середовищі з додаванням стріголактонів та неочищеного

біогазу. Стриголактони це новий клас фітогормонів, що впливають на внутрішньоклітинну активність карбоангідрази та підвищують вміст хлорофілу-а в клітинах водоростей. Вчені дійшли висновку, що оптимальний діапазон концентрації цих фітогормонів становить 10^{-9} – 10^{-7} М. Застосування такої технології дозволило підвищити продуктивність біомаси в 2 рази, а також збільшити вловлювання CO_2 до 54,67 %.

Інша робота (Gao та ін., 2018) була спрямована на дослідженні процесу культивування *Scenedesmus obliquus* на розбавленому дигестаті з стічних вод свиноферми та біогазі з біогазової установки. Найвищу продуктивність біомаси було отримано за розбавлення 80% дигестату та 20% дистильованої води. Цей показник був вищим для *Scenedesmus obliquus* на 10 % в порівнянні з *Chlorella vulgaris*, при цьому ступінь вловлювання CO_2 був також вищим і становив 58,27 % в порівнянні з 49,23 %.

Використання ціанобактерій має більшу ефективність, ніж використання водоростей. Це підтверджує дослідження проведені (Oruganti, Kumara, Tejavath, Sriariyanun, Bhattacharyya, 2023). При культивуванні *Spirulina sp.* з використанням біогазу їм вдалось досягти добової продуктивності 0,123 г/л день, що трохи вище за до цього згаданих, але при цьому вловлювання CO_2 менше та становить 47,6 %.

Дослідження (Leiton, Brenes, Uribe-Lorío, 2019) та (Choix, Snell-Castro, Arreola-Vargas, Carbajal-López, Méndez-Acosta, 2017) показали, що використання ціанобактерій *Leptolyngbya sp.* 17M та *Leptolyngbya sp.* CChF1 є дуже ефективним методом очищення біогазу від CO_2 . Культивування *Leptolyngbya sp.* 17M на біогазі має ступінь вловлювання 50%, це дозволило отримати біогаз з вмістом CH_4 майже 90%, але головною перевагою є той факт, що цих показників вдалось досягнути за 8 годин культивування. Використання *Leptolyngbya sp.* CChF1 дозволило досягти високої добової продуктивності 0,131 г/л/день при ступені вловлювання CO_2 93,82%, що знаходиться на рівні з промисловими фізичними та хімічними методами такими як: мембранне розділення при високому тиску, криогеніка, фізична абсорбція

гліколевіми ефірами та ін. При цьому цей метод вимагає менших витрат на хімічні речовини або електроенергію.

Перспективним напрямом покращення якості біогазу є застосування змішаних культур. Науковці (Marín, Carmona-Martínez, Blanco, Lebrero, Muñoz, 2021) отримали результати, які свідчать, що використання змішаної культури водоростей *Mychonastes homosphaera* та ціанобактерій *Pseudanabaena sp* у відкритій системі не тільки дозволило отримати високу добову продуктивність 15 г/м²/день, але при цьому ступінь вловлювання CO₂ становила 92 %, що відповідає сучасним фізичним та хімічним методам.

Інша робота групи вчених (Zhao, Guo, Sun, Hu, Liu, 2019) також демонструє покращення показників добової продуктивності біомаси та ступеня вловлювання CO₂ із застосуванням змішаної культури *Chlorella vulgaris* FACHB-31 та *Ganoderma lucidum* та при змішаній довжині хвилі зі співвідношенням червоного до синього світла 5:5. Такий режим освітлення дозволив досягнути найвищих показників споживання N, P, CO₂, які становили 76,67 %, 79,69 %, 60,34 % відповідно. При цьому вдалось отримати біогаз з вмістом CH₄ 88,01% на 10 день культивування.

В останні роки з'явилося все більше досліджень у яких розглядається спільне культивування водоростей та активного мулу. Вченими (Sun та ін., 2016) було встановлено, що спільне культивування *Scenedesmus obliquus* FACHB-41 з активним мулом сприяло зростанню продуктивності водоростей до 0,177 г/л/день та збільшенню ступеня вловлювання CO₂ до 80.57%. Цей результат обумовлений симбіотичними відносинами, які встановлюються між водоростями та бактеріями активного мулу.

В іншому дослідженні (Zhang, Zhao, Sun, Zhao, Liu, 2021) було також доведено, що спільне культивування *Chlorella vulgaris* FACHB-8 з активним мулом та додаванням стріголактону GR 24 в концентрації 10⁻⁹ М призводить до збільшення продуктивності біомаси в 2 рази та ступеня вловлювання CO₂ до 70% при порівнянні з монокультурами та змішаними культурами водоростей та *Ganoderma lucidum*. Це

обумовлено підвищеною активністю метаболізму та швидшим ростом за рахунок симбіотичних відносин, а також індукції GR24.

Таблиця 3.2

Характеристика водоростей та ціанобактерій для покращення показників якості біогазу

Біологічний агент	Початковий склад біогазу, %	Умови культивування	Добова продуктивність біомаси, г/л/день	Ступінь вловлювання CO ₂ , %	Джерело
<i>Chlorella vulgaris</i>	CH ₄ – 59,87 CO ₂ – 35,96 H ₂ O – 3,71 O ₂ – 0,45	$E = 200 \text{ }\mu\text{моль фотон м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ Фотоперіод = 12:12 $t = 25^{\circ}\text{C}$ $\tau = 10 \text{ днів}$	0,097	54,67	Shen та ін., 2020
<i>Scenedesmus obliquus</i>	CH ₄ – 61,23 CO ₂ – 34,69 H ₂ O – 3,22 O ₂ – 0,84	$E = 200 \text{ }\mu\text{моль фотон м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ Фотоперіод = 12:12 $t = 25^{\circ}\text{C}$ $\tau = 10 \text{ днів}$	0,099	58,27	Gao та ін., 2018
<i>Spirulina sp.</i>	-	$Q = 0,8 \text{ л/хв}$ Сонячне освітлення $\tau = 21 \text{ день}$	0,123	47,6	Oruganti, Kumara, Tejavath, Sriariyanun, Bhattacharyya, 2023
<i>Leptolyngbya sp.</i> 17M	CH ₄ – 80 CO ₂ – 20	$Q = 1 \text{ мл/с}$ Сонячне освітлення $t = 25^{\circ}\text{C}$ $\tau = 8 \text{ годин}$	-	50	Leiton, Brenes, Uribe-Lorío, 2019
<i>Leptolyngbya sp.</i> CChF1	CH ₄ – 74 CO ₂ – 25 Інші гази – 1	$n = 120 \text{ об/хв}$ $I = 1500 \text{ Люкс}$ $t = 28^{\circ}\text{C}$ $\tau = 10 \text{ днів}$	0,131	93,82	Choix, Snell-Castro, Arreola-Vargas, Carbajal-López, Méndez-Acosta, 2017

Змішана культура <i>Mychonastes homosphaera</i> та <i>Pseudanabaena sp</i>	CH ₄ – 70 CO ₂ – 29,5 H ₂ S – 0,5	$Q = 72$ л/день Сонячне освітлення $t = 5 - 25^{\circ}\text{C}$ $\tau = 10$ днів рН = 8,5	15 (г/м ² /день)	92	Marín, Carmona- Martínez, Blanco, Lebrero, Muñoz, 2021
Змішана культура <i>Chlorella vulgaris</i> FACHB-31 та <i>Ganoderma lucidum</i>	-	$E = 200$ μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ Фотоперіод = 12:12 $t = 25^{\circ}\text{C}$ $\tau = 10$ днів	0,168	60,34	Zhao, Guo, Sun, Hu, Liu, 2019
<i>Scenedesmus obliquus</i> FACHB-41 з активним мулом	CH ₄ – 54,5 CO ₂ – 45 H ₂ S – 0,5	$E = 105$ μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ Фотоперіод = 16:8 $t = 25^{\circ}\text{C}$ $\tau = 10$ днів	0,177	80,57	Sun та ін., 2016
<i>Chlorella vulgaris</i> FACHB-8 з активним мулом	CH ₄ – 62,87 CO ₂ – 33,62 H ₂ O – 3,09 O ₂ – 0,42	$E = 200$ μмоль фотон м ⁻² с ⁻¹ Фотоперіод = 12:12 $t = 25^{\circ}\text{C}$ $\tau = 10$ днів	0,342	70	Zhang, Zhao, Sun, Zhao, Liu, 2021

Отже, водорості та ціанобактерії можна ефективно застосовувати для покращення показників якості біогазу. Вони демонструють таку ж ефективність як і звичайні технології, але при цьому є набагато дешевшими. Найкраще себе показали *Leptolyngbya sp.* CChF1 та змішана культура *Mychonastes homosphaera* та *Pseudanabaena sp.*

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

4.1 Характеристика біотехнологічних продуктів

4.1.1 Біометан

Біометан – це відновлюване паливо, яке за своїми властивостями ідентичне до природного газу, але отримується не з надр землі, а під час очищення біогазу, що отримується з різної органічної сировини. Найчастіше його виробляють з гноївки, рослинних залишків, відходів переробки та з іншої сировини (Біоенергетична асоціація України - Біогаз та біометан в Україні).

Однією з головних переваг біометану є його універсальність. Його широко використовують для побутових потреб житлових об'єктів, у промисловості як джерело енергії та сировини для хімічного синтезу. У транспортній сфері у вигляді стисненого Bio-CNG та зрідженого Bio-LNG палива для легкових, вантажних автомобілів, а також громадського транспорту. Крім того, біометан має значний експортний потенціал: його можна продавати з додатковою премією в країни ЄС через систему сертифікатів походження «зеленого» газу, сприяючи скороченню викидів підприємств (Vlasiuk, 2024).

З екологічної точки зору біометан має декілька суттєвих переваг. Оскільки він виробляється з біомаси, яка вже пройшла свій життєвий цикл, його вважають вуглецево-нейтральним видом палива: CO₂, що виділяється при спалюванні біометану, вже був у атмосфері і не призводить до зміни клімату так, як викопні палива. Крім того, біометан сприяє зменшенню кількості органічних відходів та запобігає викидам метану з гною та сміття і може бути частиною замкнутого циклу циркуляційного виробництва (European Biogas Association).

Відповідно до Кодексу газотранспортної системи біометан прирівнюється до природного газу та повинен відповідати наступним фізико-хімічним показникам (Верховна Рада України, 2025):

Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата	НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ			
Розроб.		Сидоренко М.Р.			РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Стабніков В.П.					34	136
Реценз.						Кафедра БТМ		
Н. Контр.								
Затверд.		Стабніков В.П.						

Фізико-хімічні показники біометану

Назва показника	Значення	Одиниці вимірювання
<i>Компонентни склад</i>		
- Вміст метану (C ₁)	мінімум 90	мол. %
- Вміст етану (C ₂)	максимум 7	мол. %
- Вміст пропану (C ₃)	максимум 3	мол. %
- Вміст бутану (C ₄)	максимум 2	мол. %
- Вміст пентану та більш важких вуглеводнів (C ₅ +) <ul style="list-style-type: none"> - Вміст азоту (N₂) - Вміст вуглекислого газу (CO₂) - Вміст кисню (O₂) 	максимум 1 максимум 5 максимум 2 максимум 0,2	мол. % мол. % мол. % мол. %
<i>Теплота згоряння</i>		
Вища (25 °C/20 °C)		
- Мінімум	36,20	МДж/м ³
- Максимум	38,30	МДж/м ³
Нижча (25 °C/20 °C)		
- Мінімум	32,66	МДж/м ³
- Максимум	34,54	МДж/м ³
<i>Температура точки роси за вологою при абсолютному тиску газу 3,92 Мпа</i>	не перевищує -8	°C
<i>Температура точки роси за вуглеводнями при температурі газу не нижче 0°C</i>	не перевищує 0	°C
<i>Вміст механічних домішок</i>	відсутні	
<i>Вміст сірководню</i>	максимум 0,006	г/м ³
<i>Вміст меркаптанової сірки</i>	максимум 0,02	г/м ³

Таким чином, біометан — це не лише енергетичне паливо, а й важливий елемент сталого розвитку. Його виробництво дозволяє одночасно зменшити залежність від імпортного газу, переробити відходи та знизити кількість шкідливих викидів в атмосферу. Це дає змогу розглядати біометан як перспективне рішення для екологічно чистої енергетики, особливо в аграрних країнах.

4.1.2 Біодизель

Біодизель — це екологічне чисте, відновлювальне рідке паливо, яке є аналогом звичайного дизелю. Виготовляється за допомогою хімічного процесу трансестерифікації. Його властивості максимально наближені до традиційного дизельного пального, тому він може застосовуватись у більшості дизельних двигунів без потреби у змінах конструкції.



Рис. 4.1 Біодизель з водоростей (Kakara & Malothu, 2021)

На практиці біодизель використовується у транспорті — як у чистому вигляді, так і в сумішах зі звичайним дизелем. Його застосовують для легкових, вантажних автомобілів, у промисловості — для важкої техніки, але в Україні найбільше споживачем дизелю є сільське господарство.

Фізико-хімічні показники цього палива напряду залежать від сировини з якої воно виготовлене. В Україні склалась парадоксальна ситуація: наразі діючими є ДСТУ 6081:2009 «Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги» та ДСТУ EN 14214:2019 «Автомобільне паливо. Метилові ефіри жирних кислот (FAME) для дизельних двигунів. Вимоги та методи випробування (EN 14214:2012 + A2:2019, IDT)».

У табл. 1.2 наведені основні фізико-хімічні показники відповідно до ДСТУ EN 14214:2019 «Автомобільне паливо. Метилові ефіри жирних кислот (FAME) для дизельних двигунів. Вимоги та методи випробування (EN 14214:2012 + A2:2019, IDT)» (Sakthivel, Ramesh, Purnachandran, & Mohamed Shameer, 2018).

Фізико-хімічні показники біодизелю

Назва показника	Значення	Одиниці вимірювання	Метод вимірювання
Температура спалаху	мінімум 130	°C	EN ISO 3679
Цетанове число	мінімум 51		EN ISO 5165
Густина при 15°C	860-900	кг/м ³	EN ISO 3675/12185
Кінематична в'язкість при 40°C	3,5-5,0	мм ² /с	EN ISO 3104
Йодне число	-	г I ₂ /100 г	EN 14111
Кислотне число	максимум 0,5	мг КОН/г	EN 14104
Стабільність до окислення	3	год	EN 14112
Залишок вуглецю	максимум 0,3	% м/м	EN ISO 10370
Корозія міді	Клас 1		EN ISO 2160
Вміст сульфатної золи	максимум 0,02	% маси	EN ISO 3987
Вміст води та осаду	500	мг/кг	EN ISO 12937
Моногліцериди	максимум 0,8	% маси	EN 14105
Дигліцериди	максимум 0,2	% маси	EN 14105
Тригліцериди	максимум 0,2	% маси	EN 14106
Вільний гліцерин	максимум 0,02	% маси	EN 14105/14016
Загальний гліцерин	0,25	% маси	EN 14105
Фосфор	максимум 0,01	% маси	EN 14107
Загальна забрудненість	24	мг/кг	EN 12662

Основними перевагами біодизелю є його відновлювальність і здатність знижувати викиди парникових газів від 40 до 86% (Selley, Phillips, & Mudway, 2019). Крім того, його використання значно зменшує викиди сірки, через її низький вміст < 15 ppm.

Його сумісність з існуючими двигунами робить його впровадження технічно простим і економічно вигідним. Також в роботі (Rajendran et al., 2023) було зазначено, що біодизель зменшує знос паливних елементів за рахунок збільшення змазувальних властивостей сумішей, де він присутній.

В умовах України, особливо в аграрних регіонах, біодизель також розглядається як засіб посилення енергетичної незалежності та зменшення імпорту традиційного пального.

4.1.3 Білково-амінокислотний концентрат

Білки — це високомолекулярні органічні сполуки, які необхідні для підтримки всіх життєвих процесів в організмі людини та тварин. Вони виконують багато важливих функцій, а саме: структурну, каталітичну, регуляторну та інші.

Залежно від виду водоростей та умов культивування біомаса у своєму складі може мати різний вміст білку, що коливається в межах від 6 до 72 % (Wang, Tibbetts, & McGinn, 2021). За амінокислотним складом вона є повноцінною і містить всі замінні та незамінні амінокислоти (Sartori et al., 2022), які необхідні людині та тваринам.

Таблиця 4.3

Амінокислотний склад водоростей *Scenedesmus sp.*

Назва амінокислоти	Концентрація в біомасі, мг/г	Замінні
L-аланін	32,9	✓
Гліцин	18,9	✓
L-валін	19,9	×
L-лейцин	36,1	×
L-ізолейцин	14,5	×
L-пролін	33,7	✓
L-метіонін	3,4	×
L-серин	15	✓
L-треонін	7,6	×
L-фенілаланін	15,5	×
L-аспарагінова кислота	32	✓
L-цистеїн	1,7	✓
L-глутамінова кислота	25,6	✓
L-аспарагін	0,5	✓
L-лізин	11,3	×
L-глутамін	0,7	✓
L-аргінін	21,1	✓
L-гістидин	1,7	×
L-тирозин	7,6	✓
L-триптофан	3,9	×
∑ Замінних амінокислот	113,9	-
∑ Незамінних амінокислот	193,7	-

* (адаптовано з Sartori et al., 2022)

Водорості ростуть у десять разів швидше, ніж традиційні культури, такі як пшениця, кукурудза та соя, і можуть замінити велику кількість білків у кормах для тварин (Eilam, Khattib, Pintel, & Avni, 2023). На відміну від сільського господарства,

виробництво біомаси водоростей, потребує набагато менше земельних площ. Крім того, воно не призводить до забруднення питної води або морських екосистем, наприклад, через використання добрив.

Окрім заміни білково-амінокислотної складової у кормах, розглядається також варіант доповнення білкового складу рослин з низьким вмістом деяких амінокислот. У роботі (Chandran, Suri, & Choudhary, 2023) відмічено, що більшість злакових культур містить низький вміст незамінних амінокислот, таких як лізин, триптофан і треонін. Доповнення такого корму білком з водоростей виглядає перспективно.

Крім того, вирощування водоростей дозволяє досягнути скорочень викидів парникових газів, а не навпаки їх збільшувати як у випадку з сільським господарством. Також вони дозволяють підтримувати циркуляційну економіку за рахунок можливості культивування на відходах виробництв.

4.1.4 Феофорбід

Феофорбід – це органічна сполука, що належить до похідних тетрапірольних пігментів і є продуктом деградації хлорофілу. Феофорбіди позначаються як феофорбід *a* або *b* залежно від початкового типу хлорофілу (MedChemExpress).

Хімічна формула феофорбіду *a* $C_{35}H_{36}N_4O_5$, структурно ця молекула містить чотири пірольні кільця, які з'єднані у макроцикл, характерний для хлорофілу, але без центрального атома магнію. Молекулярна маса 592,7 г/моль, температура плавлення становить 191 – 195 °С, після чого речовина починає розкладатися, тому кипіння не фіксується, щільність продукту 1,27 г/мл (ChemicalBook).

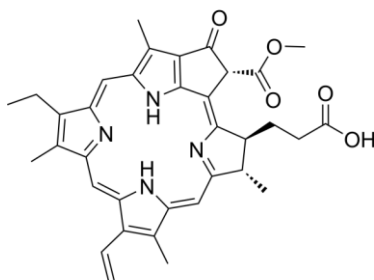


Рис. 4.2 Хімічна структура молекули Феофорбіду *a*

Продукт випускається у вигляді твердого порошку або кристалів від синювато-коричневого до практично чорного кольору. Він добре розчиняється у хлороформі, ацетоні, етанолі, але майже нерозчинний у воді. Феофорбід характеризується яскравим поглинанням у діапазоні 665 нм та 400-420 нм (ChemicalBook).

Феофорбід *a* наразі активно досліджується, але вже можна сказати, що він має широкі можливості практичного застосування завдяки своїм властивостям. Основна сфера його використання – це фотодинамічна терапія злоякісних пухлин, біля яких він накопичується та під дією світла генерує активні форми кисню, викликаючи вибіркоче знищення (Saide, Lauritano, & Ianora, 2020).

Крім того, він стимулює лімфангіогенез – утворення нових лімфатичних судин, що робить його перспективним у регенеративній медицині та лікуванні судинних порушень. Він також широко використовується в дослідження клітин як флуоресцентний маркер і модельна речовина для вивчення фототоксичності, апоптозу та окисного стресу. У лабораторних умовах феофорбід виявляє пряму протипухлинну активність, знижуючи життєздатність певних типів ракових клітин навіть без активації світлом, що додатково розширює його потенціал у фармакології та онкології (Kim et al., 2022; Ahn, Kwon, Kim, Ahn, & Yoon, 2012).

У найближчому майбутньому феофорбід може стати основою для розробки іноваційних протипухлинних препаратів, а також засобів для регенеративної медицини та керованого загоєння ран. Тому розроблення дешевих та ефективних технологій його отримання є актуальним питанням.

4.2 Огляд ринку цільової продукції

Ринок **біометану** в Україні знаходить в стані формування. Якщо розглядати його як складу газового ринку України, то він є дуже практичним і його легко інтегрувати в наявні газові мережі, але вартість біометану в середньому складає 900 євро за тис. м³, а вартість природного газу в середньому – 500 євро за тис. м³. Через цю цінову різницю українські виробники націлені на преміальні ринки

ЄС через додаткові премії за декарбонізації, у 2025 році вже відбувся перший експорт трубопровідного біометану, а також зріженого біометану (Шапошніков, 2025). Без розробки правильних механізмів з боку держави зацікавленість виробників буде низькою.

Варто згадати, що на момент жовтня 2025 року Україна втратила 60% власного газовидобутку і змушена збільшити імпорт природного газу по високим цінам (Ізотов, 2024). В цій кризовій ситуації виробництво біометану для внутрішнього споживання є цілком прийнятним.

Тобто можна розраховувати, що виробництво біометану буде прибутковим, особливо, якщо експортувати його до країн ЄС. Багато виробництв в нашій країні зацікавленні ставати «зеленими» через націленість на експорт в ЄС, тому навіть на внутрішньому ринку легко буде зайняти свою частку.

Стосо **біодизелю** можна сказати, що наразі ринок цього біопалива знаходиться в довгому застої через відсутність стимулюючих факторів з боку держави, відсутність акредитованих лабораторій для видачі сертифікатів та сильну конкуренцію з традиційним дизелем.

Споживання дизельного палива у 2020 році становило 5156 тис. т, основним споживачем якого є сільське господарство на яке припало до 13% від всього споживання (Драгнев, 2025).

Наразі в Україні побудовано 14 великих біодизельних заводів з сумарною проектною потужністю 300 тис. т на рік. Також відомо про близько 50 менших підприємств загальною потужністю до 25 тис. т біодизелю (Біоенергетична асоціація України, 2025), але знайти статистику виробництва у відкритому доступі наразі неможливо. Можна зазначити, що більшість з функціонуючих установок працює виключно на власні потреби виробників.

У 2025 році з'явилося нове підприємство, яке перше отримало ліцензію на виробництво біодизелю ФГ «Кільган І.С.» з Львівської області з потужністю 24 т на добу з амбітними планами розширити виробництво до 250 тонн, але воно орієнтоване на експорт в країни ЄС (Чурилова, 2025).

Згідно з даними Volza про імпорт в Україну (Volza FZ-LLC, 2025), кількість імпорту біодизельного палива в Україну склала 2,1 тис. відправлень, яке було імпортовано 144 українськими імпортерами від 140 постачальників. Україна імпортує більшу частину біодизельного палива або дизельного з додаванням біодизелю з Німеччини, Європейського Союзу та Болгарії.

Отже, в Україні присутні споживачі біодизелю, звісно це біодизель першого та другого покоління, але потенційно можна розраховувати, що поява біодизелю третього покоління викличе зацікавленість, і тому варто розглядати можливість експорту цього біодизелю в ЄС, так і для внутрішнього продажу.

Ринок продуктів з використанням **білково-амінокислотного концентрату** з водоростей доволі розвинений в Україні. Звісно найбільшу частку на ньому займає імпорт. Серед представленого асортименту найбільше переважають різні біологічно активні добавки з *Spirulina* та *Chlorella*. Вони позиціонуються як білково-вітамінні комплекси до раціону людей та навіть тварин.



Рис. 4.3 Приклад біологічно-активних добавок з водоростей та ціанобактерій на ринку України (Tabletki.ua)

Також на ринку представлені два виробники напоїв для людей з біомасою *Chlorella*, а саме ТОВ «Хлорелла Україна» та ФГ «У Самвела». Вони обидва сертифікували свою продукцію та отримали дозвіл на її виробництво та розповсюдження.



Рис. 4.4 Напої ТМ «Хлорелла Україна» та ТМ «Жива Хлорелла»
(Zerno-UA, 2021)

Якщо розглядати продукти які можна віднести до повноцінних кормів, то на ринку представлені корми для котів, собак та риб, які містять в своєму складі білок та амінокислоти з водоростей або ціанобактерій. Основну конкуренцію для кормів з водоростей та ціанобактерій створюють кормові дріжджі, кров'яне та м'ясне борошно, а також білок рослинного походження.

Тобто можна зробити висновок, що ринок білково-амінокислотних продуктів в Україні остаточно сформований, на товари з цієї категорії є великий попит, тому можна розраховувати, що наш виготовлений продукт зможе зайняти невелику частку на цьому ринку, якщо запропонує оптимальне співвідношення ціна/якість.

Для **Феофорбиду** а поки не сформувалося стабільного ринку в Україні. Жоден препарат на його основі не було введено в клінічну практику. Проте обсяг досліджень у світі постійно зростає, а зацікавленість в ньому тримається понад 20 років (Saide, Lauritano, & Ianora, 2020). Наразі ціна на цю речовину є дуже високою і знаходиться в діапазоні від 90 – 100 євро за 25 мг. Для пришвидшення появи продукції з феофорбідом а в своєму складі необхідно знайти технічні рішення які допомогли б знизити вартість цієї сировини і зробити її більш доступною для дослідників.

4.3 Розрахунок річної потужності виробництва

Станом на 2025 рік в Україні працює низка біометанових заводів, які відрізняються за потужністю, використаними технологіями, сировиною та розташуванням. Для формування цілісного уявлення про стан галузі виробництва біометану доцільно навести узагальнюючу інформацію про всі діючі та ті, що скоро запусяться, біометанові заводи. Ця інформація викладена в табл 1.4 (Geletukha, 2025).

Таблиця 4.4

Аналіз біометанового ринку України

Виробник	Розміщення	Тип підключення	Планова потужність, млн м ³ /рік	Сировина	Рік запуску
«Галс Агро»	Чернігівська обл.	ГРМ	3,0	гній свиней, жом цукрового буряка, кукурудзяний силос	2023
«Галс Агро»	Київська обл.	ГРМ	3,0	-	2025*
Агрохолдинг «VITAGRO»	Хмельницька обл.	ГРМ	11,0	гній свиней, гній ВРХ, солома, кукурудзяний силос	2024
«МХП»	Дніпропетровська обл.	ГРМ	24,0	курячий послід, стічні води	2025
«МХП»	Вінницька обл.	Bio-LNG	3,0	курячий послід, стічні води, кукурудзяний силос	2025
«ЮМ Ліквід Газ»	Вінницька обл.	Bio-LNG	11,0	-	2025*
«Теофіпольська енергетичної компанія»	Хмельницька обл.	ГТС	56,0	-	2025*
Загально			111,0		

Примітка: * - заводи, які планують запуситись

Для розрахунку потужності майбутнього виробництва обрано біометановий завод компанії «Галс Агро», який розміщується в Чернігівській області та має виробничу потужність 3 млн м³ біометану на рік. Це підприємство з'явилося одним із перших на ринку України, також саме з нього було здійснено перший експорт біометану за кордон, що дозволяє вважати, що воно репрезентує сучасний рівень

розвитку галузі. Крім того, завод має відкриті техніко-економічні показники, які були використані для розрахунків.

Враховуючи сировинну базу цього підприємства, прогнозується, що отриманий біогаз від процесу анаеробного зброджування буде мати приблизно 60 % метану та 40 % CO₂. Тобто, за цілий рік підприємство генерує 2 000 000 м³ CO₂. Для уловлення та утилізації такого обсягу вуглекислого газу необхідне масштабне вирощування біомаси водоростей та ціанобактерій. Оскільки головною метою цієї роботи є демонстрація ефективності запропонованої технології, цільовий рівень використання CO₂ було встановлено 3 %, що відповідає 60 000 м³ на рік.

У роботі (Mahesh, Naira, & Maiti, 2019) встановлено, що використовуючи водоростей *Scenedesmus abundans* можна досягнути 6,9 г/л АСБ за 134 години культивування. Тобто при кількості трудоднів Tr = 330 днів, за рік можна провести 59 циклів культивування. Враховуючи густину ρ_{CO2} = 1,977 кг/м³ за нормальних умов та інформацію з наукового джерела (Cardias et al., 2023), що на приріст 1 кг АСБ витрачається 1,83 кг CO₂, за рік теоретично можна отримати:

$$m_{\text{рік}}(\text{АСБ}) = (60\,000 \times 1,977) / 1,83 = 65\,893,33 \text{ кг АСБ}$$

Така кількість АСБ міститься в наступній кількості культуральної рідини:

$$V_{\text{рік.кр}} = 65\,893,33 / 6,9 = 9\,549,76 \text{ м}^3$$

Але необхідно врахувати запас на випадок непередбачуваних ситуацій та відбору проб 10 %, тобто:

$$V_{\text{ут.рік}}(\text{АСБ}) = 9\,549,76 / 1,1 = 8\,681,6 \text{ м}^3$$

Тоді за рік можна отримати:

$$m_{\text{ут.рік}}(\text{АСБ}) = 8\,681,6 \times 6,9 = 59\,903,03 \text{ кг АСБ}$$

За 1 виробничий цикл буде отримано:

$$V_{\text{цикл}} = 8\,681,6 / 59 = 146,89 \text{ м}^3 \text{ КР}$$

$$m_{\text{цикл}} = 59\,903,03 / 59 = 1\,031,51 \text{ кг АСБ}$$

Під час процесу культивування у біомасі водоростей буде захоплено:

$$m_{\text{цикл}}(\text{CO}_2) = 1\,031,51 \times 1,83 = 1\,824,32 \text{ кг CO}_2$$

$$m_{\text{рік}}(\text{CO}_2) = 1\,824,32 \times 59 = 107\,825,45 \text{ кг CO}_2$$

4.4 Розрахунок блоку культивування водоростей

Блок культивування водоростей є початковою ланкою технологічно процесу, оскільки в результаті цього етапу отримується біомаса, яка безпосередньо визначає подальші вихід цільових продуктів. Основне завдання розрахунку підібрати оптимальний варіант теплиці та фотобіореактора, які забезпечать 2 основні умови:

- Здатність підтримувати всі контрольовані параметри процесу культивування
- Забезпечити необхідну продуктивність отримання культуральної рідини

Культивування водоростей планується проводити цілий рік, тому виникає потреба підтримувати сталу температуру та доосвітлювати фотобіореактори при нестачі природнього освітлення. Найкраще в цьому плані себе покаже теплиця аркового типу. Вона не тільки забезпечить достатньо місця, а також дозволить краще утримувати температуру, а також покращить розсіювання природнього світла.

Серед матеріалів для покриття теплиці розглядають 3 види: скло, плівка та полікарбонат (Пластімет, 2025).

- **Скло** є найдорожчим серед запропонованих варіантів, воно не псується від умов навколишнього середовища, але при фізичних впливах легко розбивається та може бути травмонебезпечним.
- **Плівка** є найдешевшим варіантом, але вона має низьку міцність та потребує заміни через 1 – 2 роки.
- **Полікарбонат** є доволі гнучки, але водночас дуже міцним матеріалом. Він набагато дешевший за скло і здатен пропускати 92% світла при цьому затримуючи ультрафіолетове випромінювання. Також цей матеріал має гарні теплоізоляційні властивості і має гарантійний термін використання від виробника 10 років.

Тому доцільно використовувати саме полікарбонат в якості матеріалу для покриття теплиці.

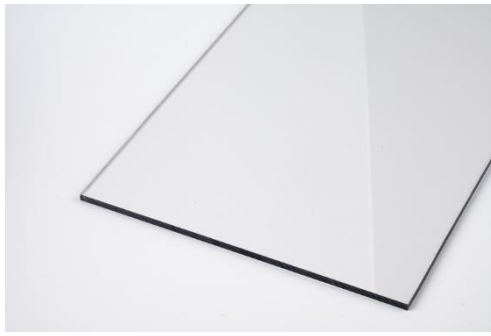


Рис 4.5 Листовий полікарбонат (Polycarbonate, 2025)

Для плоскопанельних фотобіореакторів пропонується також використати полікарбонат, але не листовий, а вже стільниковий. Він поєднує вже раніше названі переваги, з іншими. Завдяки рівній поверхні, на нього налипає менше біомаси водоростей, а також це полегшує процес миття та дезобробки. Крім того, полікарбонат є дешевшим за акрил та скло, з ним легше маніпулювати та проводити монтажні роботи. У випадку розгерметизації, його можна міцно хімічно зшити за допомогою деяких органічних розчинників (AironTrade, 2025).



Рис 4.6 Стільниковий полікарбонат (Plastok, 2025)

Пропонується використати теплицю з габаритними розмірами д×ш×в 34×6×2,8 м. Цей розмір забезпечить достатньо місця для 16 фотобіореакторів, які розміщуються в 2 ряди з розмірами д×ш×в 6×2×0,025 м, з врахування простору для обслуговування та розміщення штучного освітлення. При умові, що товщина стінок складає 1,8 мм, то об'єм однієї панелі становитиме:

$$V_{\text{панелі}} = 6 \times 2 \times (0,025 - 2 \times 0,0018) = 0,317 \text{ м}^3$$

Тоді загальний об'єм всіх панелей становить:

$$V_{\text{всіх панелей}} = 0,317 \times 16 = 5,07 \text{ м}^3$$

Для забезпечення подачі суміші газу до реакторів та забезпечування кращого перемішування необхідно розмістити 2 реактори з перемішуючими пристроями по 1 на кожен ряд панелей. Об'єм цих реакторів повинен складати $0,6 \text{ м}^3$, з коефіцієнтом заповнення $0,5$. Виходить, що робочий об'єм реактора складає:

$$V_{p,p} = 0,6 \times 0,5 = 0,3 \text{ м}^3$$

Тоді загальний об'єм 1 теплиці становитиме:

$$V_T = 5,07 + 0,3 \times 2 = 5,67 \text{ м}^3$$

Нам необхідно забезпечити $146,89 \text{ м}^3$ культуральної рідини за цикл, для цього достатньо:

$$N_T = 146,89 / 5,67 \approx 26 \text{ теплиць}$$

Для зручності використання і подальшого аналізу отримані дані були узагальнені та подані в табл. 1.4.

Таблиця 4.5

Підсумкова таблиця результатів проведених розрахунків

Параметр	Результат	Одиниця вимірювання
Потужність біометанового заводу	3 000 000	$\text{м}^3/\text{рік}$
Кількість виробленого CO_2 за рік	2 000 000	м^3
Уточнена кількість CO_2 яка буде використана	60 000	м^3
Кількість трудоднів	330	днів
Кількість виробничих циклів	59	циклів
Кількість КР за рік	8 681,6	м^3
Кількість АСБ за рік	59 903,03	кг
Кількість КР за цикл	146,89	м^3
Кількість АСБ за цикл	1 031,51	кг
Кількість уловленого CO_2 за рік	107 825,45	кг CO_2
Кількість уловленого CO_2 за цикл	1 824,32	кг CO_2
Робочий об'єм 1 теплиці	5,67	м^3
Необхідна кількість теплиць	26	шт

РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАДІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

5.1 Структура та ключові етапи технологічного процесу

На основі проаналізованої інформації розроблена схема інтегрованої технології виробництва та переробки біомаси водоростей на біометанових заводах, яка легко може бути видозмінена в залежності від доступної сировини, наявного обладнання, доступу до газотранспортної системи або газорозподільної мережі, але її головні принципи залишаться незмінним (Рис. 5.1).

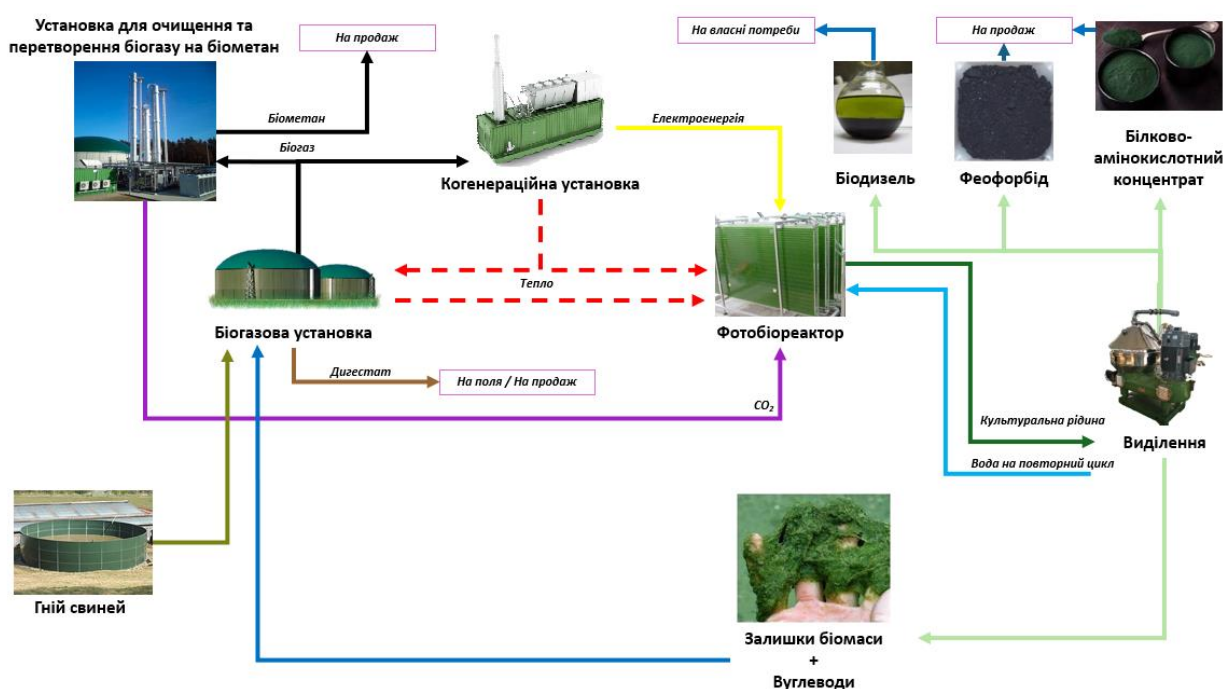


Рис 5.1 Загальна схема технологічного процесу

Початком всього циклу є біогазова установка, яка виробляє біогаз з відновлювальної сировини. Це можуть бути, як сільськогосподарські відходи, відходи виробництв, харчові відходи та інша сировина наведена в Додатку IX Директиви (ЄС) 2018/2001 (RED II).

НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ				
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Сидоренко М.Р.		
Перевір.		Стабніков В.П.		
Реценз.				
Н. Контр.				
Затверд.		Стабніков В.П.		
РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАДІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ				
		Лит.	Арк.	Аркушів
		49	136	
Кафедра БТМ				

Підбір правильної сировини з наявної напряду впливатиме на ціну біометану, яка залежить від ціни природнього газу та премії за декарбонізацію. У нашому випадку біогазова установка працюватиме на гноївці свиней, жомі цукрового буряка, кукурудзяному силосі та залишках біомаси водоростей.

Частина отриманого біогазу далі подається на очищення та покращення до біометану, а інша частина піде до когенераційної установки для вироблення тепла та електроенергії, які знадобляться для роботи біогазової установки та наших фотобіореакторів. Біометан після покращення відправлятиметься до ГТС або ГРМ на продаж. Також побічним продуктом анаеробного зброджування є дигестат, який можна використовувати, як заміник добрива і вносити на власні поля або продавати сусідам (Panuccio, Mallamaci, Attinà, & Muscolo, 2021).

Зважаючи на клімат, а саме на прохолодні зими та гаряче літо, фотобіореактори повинні розміщуватись в теплицях з полікарбонату, які будуть частково вкопані в землю. Таке рішення допоможе краще підтримувати стабільну температуру, а також полегшить задачу регулювання освітлення.

Зазвичай комфортний діапазон інтенсивності освітлення для багатьох видів становить 100 – 400 мкмоль /м²/с, що дорівнює 1/10 від природнього сонячного світла (Ana, Salgado, Vilar, Gonçalves, & Pires, 2024). Тому влітку забезпеченість природнім освітлення буде сягати 99% (враховуючі дощі та хмарні дні), а взимку зі зменшенням кута нахилу сонячних променів, забезпеченість сягатиме орієнтовно 60%, тому решту необхідно буде досвітити штучним освітлення у вигляді LED-панелей.

Також для культивування необхідно забезпечити подачу CO₂, але в нас його буде вдосталь від стадії очищення та покращення біогазу до біометану. Варто пам'ятати, що високі концентрації CO₂ мають інгібуючу дію, тому необхідно забезпечити змішування CO₂ з звичайним повітрям та рівномірну подачу всередину фотобіореактора (Ymin та Changan, 2021).

5.2.1 Вибір методу збирання біомаси

Збирання біомаси це один з найбільших енерговитратних етапів виділення продуктів, на нього припадає приблизно до 30% всіх витрат під час виділення (Singh та Patidar, 2018). Найпопулярнішими методами є центрифугування, фільтрування, седиментація, флокуляція та флотація.

Центрифугування – це процес розділення неоднорідних систем під дією відцентрових сил. Це досить швидкий та ефективний >90% метод збирання біомаси, також його можна застосовувати для будь-якого типу водоростей. З недоліків можна відмітити дорогу вартість експлуатації через велику енергозалежність (Singh та Patidar, 2018).

Фільтрація – це метод механічного розділення сумішей за рахунок затримування твердих часток в пористій мембрані. До переваг можна віднести високу ефективність збирання, меншу залежність від електроенергії, відсутність потреби в придбанні додаткових хімічних речовин, можливість рециркуляції води. Але це повільніший процес, не підходить для водоростей та ціанобактерій з малими розмірами клітин, потребує частої заміни мембран (Mohd Khairuddin та ін., 2019).

Седиментація – це процес під час якого відбувається осідання твердих речовин під дією гравітаційних сил у водних сумішах. Це дуже простий та дешевий спосіб збирання біомаси, але він повільно протікає, має високі втрати біомаси, обладнання займає багато місця, можливість повторної ресуспензії осаду (Yang та ін., 2021).

Флокуляція – це процес об'єднання клітин в великі агрегати, які легше осідають та центрифугуються. Це дуже ефективний метод 98-99%, не вимагає дорогого обладнання та великих витрат електроенергії. З недоліків можна зазначити необхідність купляти хімічні флокулянти, потребує створення оптимальних умов (Machado та ін., 2024).

Флотація – це метод спінювання розчину з метою відокремлення частинок за рахунок бульбашок газу. Цей метод має короткий час роботи, обладнання не займає багато місця, але для своєї роботи потребує ПАР, має значні втрати біомаси, не

підійде для всіх видів водоростей та ціанобактерій (Roselet, Vandamme, Muylaert, & Abreu, 2019).

З огляду на всі переваги та недоліки варто обрати комбінований метод флокуляції з фільтруванням як найбільш оптимальний. У роботі (Abomohra та ін., 2018) було порівняно різні параметри та флокулянти, а саме: натрій гідроксид, алюміній сульфат, катіонний крохмаль, магній сульфат, кальцій карбонат, сульфат заліза(III) та натрій алюмінат. Було доведено, що найкращим через свою ефективність виявився сульфат заліза(III). Для досягнення ефективності 99,5% достатньо додати 150 мг/л цієї речовини при перемішуванні протягом 15 хв, а після залишити на 40 хв до повного осідання.

5.2.2 Вибір методу попередньої обробки біомаси

Методи попередньої обробки біомаси – це механічні, фізичні, хімічні, термічні та біологічні процеси, призначені для руйнування клітинної стінки водоростей (Krishnamoorthy, Rodriguez, & Durrant, 2022). Головна мета цього процесу забезпечити максимальне вивільнення внутрішньоклітинних компонентів, таких як білки, ліпіди та вуглеводи та пігменти, для виробництва високоцінних продуктів, при цьому зберігши їх кількість та якість.

Для вибору оптимального методу попередньої обробки необхідно звернутись до наукових джерел, наприклад при дослідженні кислотного та лужного гідролізу (Rojo De Benito, Filipigh, & Bolado Rodríguez, 2023) встановили, що кислотний гідроліз з використання 2М HCl забезпечує гарний вихід вуглеводів, але супроводжується деградацією білків. Лужний гідроліз з використання 2 М NaOH забезпечив чудовий вихід білків, але при цьому продемонстрував нижчий вихід вуглеводів, особливо ксилози. Дослідники також підкреслили, що вирішальним фактором ефективності була температура.

Механічне подрібнення з використання бісерного млина вважають одним з ефективних методів для руйнування клітинної стінки водоростей (Ng, Teh, & Lee, 2024). Цей метод здатен зруйнувати найміцніші клітинні стінки, він демонструє

значне підвищення виходу білків, ліпідів та пігментів, але обмежене платом ефективності. Крім того, було відмічено часткову деградацію ліпідів та пігментів. Таким чином, бісерне подрібнення є дуже ефективним методом для збільшення виходу білка та ліпідів, але потребує ретельного підбору оптимальних параметрів для збереження пігментів від деградації.

У дослідженні (Zhao, Duan, Zhang, & Tan, 2018) для попередньої обробки біомаси було застосовано 3 різних методи: термічна обробка, ферментативний гідроліз та комбінований метод. Термічна обробка при 90 °C протягом 2,5 годин, дозволила зберегти найбільший вміст хлорофілу, але виходи ліпідів, полісахаридів та білків були найнижчі. При ферментативному гідролізі застосовували целюлазу 16 г/л протягом 5 годин, цей метод продемонстрував значно кращі показники виходу продуктів, але всеодно не був оптимальним. Комбінований метод продемонстрував найкращі виходи полісахаридів, ліпідів та білків, але при цьому збереження хлорофілу впало на 10%. Незважаючи на це падіння, краще обрати комбінований метод, за кращі показники виходу по іншим цільовим продуктам, а також за зменшення необхідної концентрації целюлази.

Отже, обробка біомаси буде відбуватись за комбінованим методом спершу біомасу водоростей витримують при 90°C протягом 2,5 годин для послаблення структури клітинної стінки, а далі додають целюлазу 12 г/л з витримкою 4 години для остаточного руйнування клітинної стінки та вивільнення внутрішнього вмісту клітин.

5.2.3 Вибір комплексного методу виділення продуктів

В якості основного шляху виділення продуктів був обраний комплексний метод запропонований (Zhao, Duan, Zhang, & Tan, 2018). Він полягає у використанні правильної комбінації розчинників та речовин, які здатні впливати на фізико-хімічні показники полісахаридів, білків, ліпідів та хлорофілу/феофорбиду, при цьому формуючи різні фази, які містять в собі тільки один цільовий продукт. Також в цій

роботі було проведено роботу з оптимізації методик і підібрані найкращі пропорції та концентрації всіх речовин.

Варто наголосити, що такий підхід дозволяє зберегти властивості кінцевих продуктів. Він добре масштабується, використовує відносно дешеві хімічні речовини. Комплексність та збалансованість цього методу робить його перспективним для переробки біомаси водоростей.

5.2.4 Вибір методів випарювання

Випарювання — це технологічний процес концентрування твердих речовин, шляхом видалення з них розчинника шляхом його перетворення на газ.

У контексті нашої технології цей метод застосовується для видалення етанолу з температурою кипіння 70°C, n-гексану з температурою кипіння 69°C та т-бутанолу з температурою кипіння 83°C. Ці температури є небажаними для термолабільних продуктів, які ми намагаємося сконцентрувати. Для них температура не перевищувати 50-60°C (Карлаш & Красінько, 2022), тому виникає потреба у використанні вакуум-випарювання, що дозволяє значно знизити температури кипіння зазначених розчинників. Крім того, бажано зменшити час перебування середовища в апараті до найменш можливого значення.

Під ці вимоги підпадають вакуум випарники з стікаючою плівкою, а також з перемішування плівки, тонкошарові з пластинчастим та тарілчастим теплообміном. Але варто звернути увагу, що деякі продукти можуть мати високу в'язкість, наприклад, полісахариди, білки та амінокислоти, тому краще обрати одразу 2 типи вакуум випарників: з стікаючою плівкою та з перемішуванням плівки, які будуть застосовуватись для відповідних продуктів.

Отже, рідка фаза або відділені залишки біомаси будуть подаватись на вакуум випарний апарат, де будуть під вакуумом та дією пари нагріватись до 50°C протягом короткого контакту зі стінкою труби. Розчинники будуть швидко випаровуватись і відводитись на регенерацію, а концентрований продукт буде накопичуватись у бачку.

5.2.5 Вибір методів сушіння

Сушіння – це процес видалення вологи з вологого матеріалу. Метою цього процесу є отримання кінцевого продукту з вмістом вологи 10 %. Існує декілька типів сушіння (Карлаш & Красінько, 2022) за способом підведення теплоти до напівпродукту, а саме: контактне, конвективне і радіаційне, сублімаційне.

При контактному сушінні передача тепла до напівпродукту здійснюється завдяки безпосередньому дотику з розігрітими поверхнями. Такий спосіб має низку суттєвих недоліків: через тривалу дію високих температур може відбуватися частковий розпад білків, а також підгоряння верхнього шару продукту.

Радіаційне сушіння базується на надходженні тепла у вигляді інфрачервоного випромінювання. Однак і цей метод має певні обмеження: можливе псування сировини, нерівномірне висушування через проникнення вологи у глибші шари напівпродукту, а також потреба у дорогому обладнанні.

Ліофільне сушіння є кращим варіантом для термолабільних продуктів. За такого способу сушіння молекулярна структура матеріалу зберігається майже без змін і висушений матеріал характеризується доброю дисперсністю і пористістю. Головними недоліками цього методу є його дороговизна, а також повільність висушування.

Конвективне сушіння має істотні переваги порівняно з іншими: процесами: відбувається значно швидше, контакт із сушильним агентом є нетривалим, тому зовнішні шари напівпродукту не перегріваються і зберігають якість.

У роботі (Zhao, Duan, Zhang, & Tan, 2018) використовували ліофільне сушіння для кожного продукту, проте такий підхід має суттєві обмеження при масштабуванні. Тому пропонується використовувати вакуум сушіння для феофорбиду через його значну термолабільність та окислювальну деградацію. Дослідження (Stramarkou et al., 2021) демонструє, що втрати різних пігментів та хлорофілу є незначними в порівнянні з ліофільним сушінням, але прийнятними для промислового використання. Цей метод потребує значно менше витрат електроенергії, підходить для сушіння абсолютно всіх термолабільних продуктів і

тому є оптимальним. Для сушіння білково-амінокислотного концентрату пропонується використати розпилювальну сушарку через її ефективність та менші втрати цих продуктів (Vaune et al., 2025).

Отже, сушіння феофорбиду буде відбуватись у вакуум сушильній шафі за температури 30 °C до моменту досягнення вмісту вологи 10%. А сушіння білків буде відбуватись на розпилювальній сушарці при 18 000 об/хв з температурою повітряного потоку 200 °C і часом контакту 1 с.

5.2.6 Обґрунтування допоміжних стадій для післяферментаційних процесів

Для перебігу деяких технологічних процесів на технологічній схемі варто передбачити декілька стадій допоміжних робіт, а саме:

- Приготування наважки $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- Приготування наважки $(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)
- Приготування наважки целюлази
- Приготування екстрагенту
- Приготування 0,8 М розчину H_2SO_4 для стадії кислотного гідролізу;
- Приготування 1 М розчину КОН для нейтралізації кислоти;
- Приготування 1,2 % розчину NaOH для процесу трансестерифікації;
- Приготування 1 % розчину оцтової кислоти для очищення біодезелю.

5.3 Обґрунтування кінцевої форми цільових продуктів

5.3.1 Обґрунтування форми випуску біометану

Біометан може виробляти в декількох товарних формах: трубопровідний, зріджений та стиснений.

Трубопровідний біометан є газоподібним і подається до газорозподільних мереж або газотранспортної системи. Його перевагою є те, що він не потребує додаткової обробки і одразу після очищення та стиснення може подаватись до трубопроводів, тому його собівартість є нижчою за інші, але недоліком є його географічна прив'язаність виробництва до трубопроводів, які можуть знаходитись

дуже далеко від виробництва.

Зріджений біометан має форму рідини і застосовується на транспорті. Він потребує постійного охолодження до $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$, доставляється виключно транспортом з криостернами до спеціальних заправних станцій. На відміну від зрідженого пропан/бутану він піддається постійному випаровуванню, тому будь-який транспорт на цьому виді палива не любить довгих простоїв. Також, варто відмітити, що для зрідження біометан повинен мати чистоту не менше 99 %, тому що залишки CO_2 заважають процесу зрідження (Крамар, 2025).

Стосовно переваг, варто відмітити, що це дуже безпечна і відправцьована технологія, так як рідкий біометан не горить. Головною перевагою зрідженого біометану є його компактність через велику об'ємну енергетичну щільність, яка становить 21000 кДж/л , тобто при спалюванні однакового об'єму палива зі зрідженого біометану виділиться більша кількість енергії, ніж від стисненого.

bio-LNG transport tank



Рис. 5.2 Контейнери для перевезення зрідженого біометану (Крамар, 2025)

Стиснений біометан також має газоподібну форму та застосовується на транспорті. Його застосування обмежене за рахунок нижчої енергетичної щільності, яка майже в 2 рази нижча за зріджений біометан, тобто для подолання однакової відстані стислого біометану потрібно в 2 рази більше, а відповідно потрібні баки більшого розміру, які негативно впливають на вагу автомобіля, також необхідна розвинути структура заправних станцій. Також ця форма хоч і не потребує значного охолодження, але потребує високого тиску, що може створювати небезпеку. Але з позитивного варто відмітити, що вміст CO_2 не впливає на стиснення і тому вимоги до чистоти значно нижчі, ніж у зрідженого біометану (Крамар, 2025).



Рис. 5.3 Контейнери для перевезення стисненого біометану (Крамар, 2025)

Зважаючи на географічне розташування нашого виробництва, а саме близьке розташування до газових трубопроводів та далеке розташування від приймальних хабів пропонується подавати біометан до трубопроводів для подальшого експорту ЄС або застосування на внутрішньому ринку.

5.3.2. Обґрунтування форми випуску та вибору упаковки для феофорбїду

Феофорбїд зазвичай продають у формі порошку, дрібних кристалів або готових розчинів. Найкраще обрати форму порошку, оскільки тільки вона зможе забезпечити довготривалу стабільність продукту, а також подовжить термін його зберігання. Крім того, ця форма є дуже зручною через гнучкість та точність дозування.

Зважаючи на фізико-хімічні показники феофорбїду, а саме: його високу чутливість до світла та кисню пропонується використати в якості упаковки чорні поліетиленові пакети для вакуумування. Вони збережуть феофорбїд від дії прямих сонячних променів і від дії УФ-випромінювання, також за рахунок вакууму знизиться парціальний тиск кисню всередині упаковки, а відповідно сповільняться всі окисні реакції. Крім того, цей матеріал має низьку паропроникність.



Рис. 5.4 Чорний поліетиленовий пакет для вакуумування (Lookfort, 2025)

5.3.3. Обґрунтування форми випуску та вибору упаковки для білково-амінокислотного концентрату

Через високу конкуренцію на ринку кормів та кормових добавок для домашніх тварин упаковку для концентрату необхідно максимально здешевити, але при цьому вона повинна забезпечувати належне зберігання продукту. Основними факторами, які можуть зіпсувати цей продукт, є волога та пряма дія сонячних променів. Тому пропонується використовувати непрозорі пластикові банки об'ємом до 3 л з гвинтовою кришкою з ущільнюючим кільцем. Ця тара буде мати малу собівартість, а також забезпечить належні умови зберігання.



Рис. 5.5 Пластикові банки з гвинтовою кришкою (ХарПласт, 2025)

5.3.4. Обґрунтування вибору упаковки для біодизелю

Вибір упаковки для біодизелю є дуже важливим етапом. Зберігати його на відкритому повітрі є неефективною та дуже небезпечною справою. Світло, волога та кисень негативно впливають на метилові естери жирних кислот з яких складається

біодизель, призводячи до їх гідролізу та окислення. Зазвичай біодизель зберігають у великих закритих резервуарах з підтримкою стабільної температури та вологості, а для транспортування вже використовують цистерни, або менші металеві чи поліетиленові бочки або малі каністри.

Зважаючи на незначні об'єми виробництва вироблений біодизель варто спрямувати не на продаж, а на використання під власні потреби. Це не тільки підвищить енергетичну незалежність, а також зменшить вуглецевий слід всього виробництва і відповідно отриманого біометану. Тому пропонується зберігати біодизель в окремому резервуарі, а потім його направляти до малих заправних станцій.



Рис. 5.6 Мобільна заправна станція 20FT від Shandong Tengxing New Energy Technology Co., Ltd. (Alibaba, 2025)

5.4 Підбір технологічного обладнання з урахуванням матеріальних потоків

Підбір технологічного обладнання для всіх післяферментаційних стадій наведено в табл. 5.1

Вихідні дані:

Об'єм культуральної рідини за один цикл ферментації - 146,89 м³.

Концентрація абсолютно сухої біомаси в культуральній рідині - 6,9 г/л

Таблиця 5.1

Підбір технологічного обладнання з врахуванням матеріальних потоків по стадіях виробництва

№ п/п	Назва стадії	Надійшло на стадію		Втрати	Вийшло зі стадії		Необхідне обладнання
		Матеріальні потоки	Значення		Матеріальні потоки	Значення	
1	2	3	4	5	6	7	8
ДР 1 Приготування наважок допоміжних речовин на технологічний процес							
1	ДР 1.1 Приготування наважки амоній сульфату	Амоній сульфат	4 112,46 кг	-	Наважка амоній сульфату	4112,46 кг	Вагова платформа
2	ДР 1.2 Приготування наважки ферум(III) сульфату	Ферум(III) сульфат	22,03 кг		Наважка ферум(III) сульфату	22,03 кг	Технічні ваги
3	ДР 1.3 Приготування наважки целюлази	Целюлаза	80,27 кг		Наважка целюлази	80,27 кг	Технічні ваги
ДР 2 Приготування допоміжних розчинів на технологічний процес							
4	ДР 2.1 Приготування 0,8 М розчину сульфатної кислоти для стадії кислотного гідролізу	Сульфатна кислота 44%	258,63 л	-	Розчин 0,8 М сульфатної кислоти	1 957,91 л	Реактор об'ємом 3 м ³ з кислотостійкої нержавіючої сталі
		Вода дистильована	1 699,28 л				
5	ДР 2.2 Приготування 1 М розчину натрій гідроксиду для нейтралізації кислоти	Натрій гідроксид	105,71 кг		Розчин 1 М натрій гідроксиду	2 642,77 л	Реактор об'ємом 3 м ³ з нержавіючої сталі
		Вода	2 593,2 л				
6	ДР 2.3 Приготування екстрагента	Етанол	8 986,71 л		Екстрагент	17 873, 42 л	Реактор об'ємом 20 м ³ з нержавіючої сталі
		n-гексан	8 986,71 л				

7	ДР 2.4 Приготування каталізаторного розчину натрій гідроксиду з метанолом для процесу трансестерифікації	Натрій гідроксид	1,17 кг		Каталізаторний розчин	27,35 л	Реактор об'ємом 50 л з нержавіючої сталі
		Метанол	26,8 л				
8	ДР 2.5 Приготування 1 % розчину оцтової кислоти для очищення	Оцтова кислота крижана	1,07 л		1 % розчин оцтової кислоти	107,38 л	Реактор об'ємом 200 л з нержавіючої сталі
		Дистильована вода	106,31 л				
ТП 3 Зберігання культуральної рідини							
9	ТП 3.1 Підтримання умов для зберігання культуральної рідини	Культуральна рідина	146 885,63 л	-	Культуральна рідина	146 885,63 л	3 Реактори об'ємом 50 м ³
ТП 4 Збирання біомаси							
10	ТП 4.1 Додавання флокулянту	Культуральна рідина	146 885,63 л		Суміш культуральної рідини та флокулянта	146 897,24 л	Стрічковий фільтр-прес продуктивністю 50 м3/год
		Наважка ферум(III) сульфат	22,03 кг				
11	ТП 4.2 Гравітаційне осадження та збір біомаси	Суміш культуральної рідини та флокулянта (АСБ)	146 897,24 л (1013,51 кг)	1 % 10,14 кг (АСБ)	Волога біомаса (АСБ)	6 689,17 кг 1 003,38 кг	
					Залишки культуральної рідини	140 208,07 л	

ТП 5 Попередня обробка біомаси							
12	ТП 5.1 Термічна обробка	Волога біомаса	6 689,17 кг	-	Волога біомаса	6 689,17 л	Реактор об'ємом 8 м ³
13	ТП 5.2 Ферментативна обробка	Волога біомаса (Вуглеводи) (Білки) (Ліпіди) (Хлорофіл)	6 689,17 кг (301,01 кг) (391,32 кг) (140,47 кг) (16,05 кг)	Відсоток переходу 85,69 % (Полісахариди) 25,22 % (Білки) 80,24 % (Ліпіди)	Суспензія залишків біомаси (Вуглеводи) (Білки) (Ліпіди) (Хлорофіл)	6 756,06 л	Реактор об'ємом 8 м ³
		Целюлаза	80,27 кг				
ТП 6 Відділення обробленої біомаси							
14	ТП 6.1 Центрифугування обробленої біомаси	Суспензія оброблених залишків біомаси			Супернатант (Вуглеводи) (Білки) (Ліпіди)	6 168,69 л 250,20 кг 95,73 кг 26,92 кг	Центрифуга з продуктивністю 2 м ³ /год
			6 756,06 л	3 % 17,62 кг (Залишки біомаси)	Преципітат (Залишки біомаси) (Вуглеводи) (Білки) (Ліпіди) (Хлорофіл)	1 957,91 кг 587,37 кг 41,78 кг 283,85 кг 109,33 кг 11,56 кг	

ТП 7 Трифазне розділення супернатанту								
15	ТП 7.1 Додавання амоній сульфату до супернатанту	Супернатант	6 168,69 л	-	Суміш супернатанту та амоній сульфату	8 492,12 л	Реактор об'ємом 10 м ³	
		Наважка амоній сульфату	4 112,46 кг					
16	ТП 7.2 Додавання t-бутанолу	Суміш супернатанту та амоній сульфату	8 492,12 л	-	Суміш супернатанту, амоній сульфату та t-бутанолу	25 476,35 л		
		t-бутанол	16 984,23 л					
17	ТП 7.3 Відстоювання та зливання фаз	Суміш супернатанту, амоній сульфату та t-бутанолу	25 476,35 л	2 % 329,49 л	Верхня фаза t-бутанолу	16 145,21 л		2 Екстракційні колони об'ємом 13 м ³ Реактор об'ємом 1 м ³ Реактор об'ємом 10 м ³
				2% 16,66 л	Проміжна фаза з осадженими білками	816,41 л		
				2% 163,37 л	Нижня фаза з розчиненими полісахаридами	8 005,20 л		
18	ТП 7.4 Відділення білків та амінокислот	Проміжна фаза з осадженими білками	816,41 л	3 % 2,81 кг (Білки)	Суміш білків, амінокислот, амоній сульфату та залишків розчинника	231,64 л		Центрифуга продуктивністю 1 м ³ /год
				-	Супернатант	644,83 л	Реактор об'ємом 1 м ³	

ТП 8 Виробництво білково-амінокислотного концентрату							
19	ТП 8.1 Випарювання залишків t-бутанолу	Суміш осаджених білків, амоній сульфату та розчинників	231,64 л	2 % 1,82 кг (Білки)	Забрудненні концентрат амоній сульфатом	296,44 кг	Плівковий вакуум-випарник продуктивністю 200 л/год
					t-бутанол	16,42 л	
					Вода	107,03 л	
20	ТП 8.2 Промивання концентрату водою	Забрудненні концентрат амоній сульфатом	296,44 кг	-	Суспензія білків та амоній сульфату	606,84 л	Реактор об'ємом 1 м ³
		Вода очищена	300 л				
21	ТП 8.3 Відділення білків та амінокислот	Суспензія білків та амоній сульфату	606,84 л	3 % 2,68 кг (Білки)	Вологий білково-амінокислотний концентрат	144,17 кг	Центрифуга продуктивністю 300 л/год
				-	Супернатант	485,09 л	
22	ТП 8.4 Сушіння білково-амінокислотного концентрату	Вологий білково-амінокислотний концентрат	144,17 кг	5 % 4,33 кг (Білки)	Висушений білково-амінокислотний концентрат	91,31 кг	Розпилювальна сушарка продуктивністю 100 кг/год
					Водяна пара	52,86 л	
ТП 9 Виділення полісахаридів							
23	ТП 9.1 Осадження полісахаридів	Нижня фаза з розчиненими полісахаридами (Полісахариди)	8 005,20 л <i>237,84 кг</i>	5% 11,89 кг (Полісахариди)	Суміш осаджених полісахаридів з етанолом (Полісахариди)	40 025,99 л	Реактор об'ємом 50 м ³
		Етанол	32 020,79 л	-		225,95 кг	

Продовження табл. 5.1

24	ТП 9.2 Відділення полісахаридів	Суміш осаджених полісахаридів з етанолом	40 025,99 л	3% 6,78 кг (Полісахариди)	Забрудненні полісахариди (Полісахариди)	438,34 кг <i>219,17 кг</i>	Нутч-фільтр 10 м ³ /год
				-	Розчин етанолу та залишків фази	39 587,65 л	
25	ТП 9.3 Випарювання етанолу та регенерація етанолу	Забрудненні полісахариди	438,34 кг	2 % 4,38 кг (Полісахариди)	Вологі полісахариди (Полісахариди)	275,67 кг <i>214,79 кг</i>	Плівковий вакуум-випарник з продуктивністю 200 л/год
				4 %	Етанол	182,64 л	
ТП 10 Кислотний гідроліз преципітату							
26	ТП 10.1 Кислотний гідроліз	Преципітат (Вуглеводи) (Білки) (Ліпіди) (Хлорофіл)	1 957,91 кг <i>41,78 кг</i> <i>283,85 кг</i> <i>109,33 кг</i> <i>11,56 кг</i>	Перетворення хлорофілу 51,33 %	Гідролізат (Вуглеводи) (Білки) (Ліпіди) (Феофорбід)	3 915,81 л <i>41,78 кг</i> <i>283,85 кг</i> <i>109,33 кг</i> <i>5,93 кг</i>	Реактор об'ємом 10 м ³ з кислотостійкої нержавіючої сталі
		Розчин 0,8 М сульфатної кислоти	1 957,91 л				
27	ТП 10.2 Нейтралізація кислоти	Гідролізат	3 915,81 л	-	Нейтралізований гідролізат	6 558,58 л	
		Розчин 1 М натрій гідроксиду	2 642,77 л				
28	ТП 10.3 Відділення залишків біомаси	Нейтралізований гідролізат	6 558,58 л	3 % 17,62 кг (Залишки біомаси)	Вологі залишки біомаси (Залишки біомаси)	1 909,62 л <i>569,75 кг</i>	Центрифуга з продуктивністю 2 м ³ /год
				-	Супернатант	4 648,96 л	

ТП 11 Двофазна екстракція залишків біомаси							
29	ТП 11.1 Екстракція	Вологі залишки біомаси	1 909,62 л	Відсоток екстракції 60 %	Суміш залишків біомаси з екстрагентом	13 367,37 л	Реактор об'ємом 2 м ³
		Екстрагент	11 457,75 л				
30	ТП 11.2 Відстоювання та зливання фаз	Суміш залишків біомаси з екстрагентом	13 367,37 л	2 % 112,51 л	Верхня фаза ліпідів з n-гексаном (Ліпіди)	5 513,08 л (67,21 л)	екстрактор об'ємом 14 м ³ 2 реактори об'ємом 10 м ³ Реактор об'ємом 2 м ³
				2 % 43,43 л	Проміжна фаза з залишками біомаси (Залишки біомаси)	2 138,56 л (498,87 л)	
				2 % 111,20 л	Нижня фаза етанолу та феофорбиду (Феофорбід)	5 448,39 л (2,52 л)	
31	ТП 11.3 Повторна екстракція	Проміжна фаза з залишками біомаси	2 138,56 л	Відсоток екстракції 88 %	Суміш залишків біомаси з екстрагентом	8 554,22 л	Реактор об'ємом 3 м ³
		Екстрагент	6 415,67 л				

32	ТП 11.4 Повторне відстоювання та зливання фаз	Суміш залишків біомаси з екстрагентом	8 554,22 л	2 % 62,49 л	Верхня фаза ліпідів з n-гексаном (Ліпіди)	3 062,04 л (41,0 л)	Екстрактори об'ємом 10 м ³
				2 % 39,75 л	Проміжна фаза з залишками біомаси (Залишки біомаси)	1 947,54 л (456,09 л)	
				2 % 62,26 л	Нижня фаза етанолу та феофорбід (Феофорбід)	3 050,91 л (1,5 л)	
ТП 12 Виробництво феофорбід							
33	ТП 12.1 Випарювання та регенерація етанолу	Нижня фаза етанолу з розчиненим феофорбідом	8 499,30 л	2 % 0,11 кг (Феофорбід)	Вологий феофорбід (Феофорбід)	8,63 кг 5,18 кг	Плівковий вакуум-випарник з продуктивністю 4 м ³ /год Реактор на 10 м ³
				4 % 339,71 л	Регенований етанол	8 152,95 л	
34	ТП 12.2 Сушіння феофорбід	Вологий феофорбід	8,63 кг	5 % 0,26 кг	Феофорбід (CP = 90%)	5,75 кг	Вакуум сушильна шафа
				-	Конденсат	2,88 л	

ТП 13 Виробництво біодизелю							
35	ТП 13.1 Випарювання та регенерація n-гексану	Забрудненні ліпіди n-гексаном	8 575,12 л	2% 2,16 л	Ліпіди	106,02 л	Плівковий вакуум-випарник з продуктивністю 4 м ³ /год
				4% 338,85 л	Регенований n-гексан	8 132,37 л	
36	ТП 13.2 Трансестерифікація	Ліпіди	106,02 л	-	Суміш біодизелю та сирого гліцерину	133,37 л	Реактор на 1 м ³ Роторний вакуум випарник на 30 л
		Каталізаторний розчин	27,35 л				
37	ТП 13.3 Відділення та очищення сирого гліцерину	Суміш біодизелю та сирого гліцерину	133,37 л	5% 5,30 л (Біодизель)	Забруднений біодизель	107,38 л	
				4% 0,54 л	Метанол	12,86 л	
				-	Технічний гліцерин	12,58 л	
38	ТП 13.4 Очищення біодезеля	Забруднений біодизель	107,38 л	1 % 1,01 л (Біодизель)	Суміш біодизелю з залишками води та метанолу	101,24 л	
		Дистильована вода	322,15 л		Промивальний розчин	435,67 л	
		1 % розчин оцтової кислоти	107,38 л				
39	ТП 13.5 Видалення вологи	Біодизель з водою	107,34 л	-	Біодизель	99,71 л	
					Випари метанолу та води	1,54 л	

ТП 14 Виробництво біометану							
40	ТП 14.1 Випарювання розчинників з залишків біомаси	Забрудненні залишки біомаси розчинниками	1 947,54 л	2 % (Залишки біомаси)	Вологі залишки біомаси (Залишки біомаси)	885,338 кг 446,97 кг	Плівковий вакуум-випарник з продуктивністю 1 м ³ /год
				-	Суміш розчинників	1 072,40 л	Реактор об'ємом 1,2 м ³
41	ТП 14.2 Анаеробне розкладання залишків біомаси	Вологі залишки біомаси	885,34 кг	0,01 %	Біогаз	175,54 м ³	Метантенк
		Вологі полісахариди	275,67 кг				
42	ТП 14.3 Очищення та перетворення біогазу на біометан	Біогаз	175,54 м ³	-	Біометан	122,87 м ³	Система очищення та покращення біогазу до біометану
					CO ₂	52,66 м ³	
ПМВ 15 Пакування, маркування, цільових продуктів							
43	ПМВ 15.1. Пакування та маркування висушеного білково-амінокислотного концентрату	Висушений білково-амінокислотний концентрат	91,31 кг	1% 0,91 кг	Коробки з банками з білково-амінокислотним концентратом (Банки з концентратом)	3 шт 30 шт	Фасувальна установка
		Пластикова банка з гвинтовою кришкою	30 шт	-	Залишки білково-амінокислотного концентрату	0,4 кг	
		Коробки з гофрокартону	3 шт				

Закінчення табл. 5.1

44	ПМВ 15.2. Пакування та маркування висушеного феофорбїду	Висушений феофорбїд	5,52 кг	1% 0,055 кг	Коробка з пакетами з феофорбїдом <i>Пакети з феофорбїдом</i>	1 шт	Технічні ваги
		Чорні поліетиленові пакети	22 шт	-		22 шт	
		Коробка з гофрокартону	1 шт		Залишок феофорбїду	0,023 кг	
45	ПМВ 15.3. Зберігання та відвантаження біодизелю	Очищений біодизель	99,71 л	-	Очищений біодизель	99,71 л	Збірник на 800 л

5.4 Специфікація обладнання

Таблиця 5.2

Специфікація обладнання для апаратурної схеми виробництва

Позиція	Найменування	Кількість	Технічна характеристика
1	2	3	4
P-1 P-3 P-5	Реактор 50 м ³	3	Реактор змішувач об'ємом 50 м ³ JZ-50000 Виробник Guangdong Jinzong Machinery Co., Ltd., Ltd. (Китай); GJМатеріал нержавіюча сталь SS316 L [1]
H-2 H-4 H-6	Перестальтичний насос	3	Перестальтичний насос HWH76- 915B продуктивністю 20 м ³ /год. Виробник Henan Wode Heavy Industry Co., Ltd. (Китай) Робочий тиск 10 бар, Потужність 18,5 кВт. [2]
СФП-7	Стрічковий фільтрпрес	1	Стрічковий фільтр прес DY-3000 продуктивністю 20 м ³ /год Виробник Shandong Kangtailong Intelligent Equipment Co., Ltd. (Китай); Потужність двигуна 5,5 кВт [3]
P-8 P-51	Реактор змішувач для попередньої обробки та проведення кислотного гідролізу	2	Реактор змішувач 8 м ³ Weihai Huixin Chemical Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 316 L Робочий тиск -1 до 70 бар, Робоча температура від 0 до 350 °C [4]
H-9 H-11	Перестальтичний насос	1	Перестальтичний насос HRB-50 Виробник Botou Honghai Pump Co., Ltd. (Китай); Потужність 2,2 Вт; Продуктивність 3 м ³ /год; [5]
C-10 C-55	Сепаратор	2	Сепаратор FIVEMEN Перестальтичний насос Виробник Botou Honghai Pump Co., Ltd. (Китай); Продуктивність 3 м ³ /год; Габаритні розміри (ДхШхВ): 900x600x1150 мм[6]
P-12	Реактор 10 м ³	1	Реактор змішувач 10 м ³ Виробник Wenzhou Ace Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь SS316 L [7]

Н-13 Н-50	Перестальтичний насос для перекачування Суспензії біомаси з амоній сульфатом та розчину сульфатної кислоти для кислотного гідролізу	2	Кислотостійкий перестальтичний насос Hangzhou Chayo Environmental&Technology Co., Ltd. (Китай); Потужність 3,5 Вт; Продуктивність 3.5 м ³ /год; Матеріал нержавіюча сталь SS316L та полівініліденфторид [8]
З-14	Збірник для t-бутанолу	1	Збірник 20 м ³ Виробник Laizhou New Hongda Chemical Machinery Co (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 316 L [9]
Н-15	Перестальтичний насос для перекачування t-бутанолу	1	Хімічно стійкий перестальтичний насос Gaodetec GH series Виробник Gaode Equipment Co., (Китай); Потужність 3,5 кВт; Продуктивність 10 м ³ /год; [10]
ЕК-16 ЕК-18	Екстракційна колона	2	Промислова екстракційна колона TQB-12 Виробник Sanda Industrial Co., Ltd. (Китай); Об'єм 13 м ³ Матеріал нержавіюча сталь SS316 L [11]
Н-17 Н-19 Н-75	Відцентровий насос для перекачування фаз від ЕК-16 та ЕК-18, перекачування концентрату ліпідів від ПВУ-74 до Р-81	3	Відцентровий насос SAER M-400B Виробник SAER (Італія); Матеріал латунь; Потужність 1,5 кВт; Продуктивність 10 м ³ / год [12]
З-20	Збірник	1	Збірник 1 м ³ Виробник Weihai Borui Chemical Machinery Co., Ltd. (Китай) [13]
Н-21 Н-23 Н-25 Н-29	Відцентровий насос для перекачування проміжної фази, суміші білку, амоній сульфату та залишків розчинника	4	Відцентровий насос Виробник Shenya Inc (США) Продуктивність 1 м ³ /год, Потужність 0,55 кВт Макс. тиск на вході: 0,3 Мпа, Температурний режим -10 до +140°C [14]

Продовження табл. 5.2

C-22	Сепаратор	1	Сепаратор DHC400 Виробник Hangzhou Reyes Machinery Co., Ltd. (Китай) Продуктивність 1000 л/год, Габаритні розміри ДхШхВ 1555x1130x1640 мм, Потужність 7,5 кВт [15]
3-24	Збірник для суміші білку амоній сульфату та залишків розчинника	1	Збірник 300 л HR-300 Виробник DEVELOPMENT TECHNOLOGY COMPANY LIMITED (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 304 L [16]
ПВУ-26	Плівковий з стікаючою	1	Вакуум-випарний апарат з стікаючою плівкою JMNS 200 Виробник: Pressure Equipment Directive compliant (Китай); Продуктивність 200 л/год; Робоча температура >55 °С; Ступінь вакууму -0,08 МПа Матеріал нержавіюча сталь SUS316L; [17]
3-27 3-83	Збірник для концентрату білків Збірник для біодизелю від Р-81	2	Збірник 800 л Виробник Jiaozuo Double Eagle Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 304 L [18]
ОД-28 ОД-49 ОД-79	Об'ємний дозатор для дозування дистильованої води до Р-48 та Р-78		Об'ємний дозатор для води SDM 50 S Kumkaaya Виробник Kumkaaya (Італія) Потужність 0,18 кВт Габаритні розміри 160x120x220 мм [19]
C-30	Сепаратор	1	Сепаратор DHC230 Продуктивність 500 л/год, Габаритні розміри ДхШхВ 850x625x985 мм, Потужність 2,2 кВт [20]
Н-31 Н-33 Н-45 Н-47 Н-70	Перестальтичний насос	5	Перестальтичний насос 253D Виробник ТехнологПлюс (Україна); Потужність 1,5 кВт; Продуктивність від 6 л/хв [21]
3-32	Збірник для білків	1	Збірник 200 л Виробник Wenzhou Aowei Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 316 L [22]

РС-34	Розпилююча сушарка	1	Розпилювальна сушарка LPG-200 Виробник Griffin Machinery (Україна) Температура на вході 140-350°C Температура на виході 80-90°C Продуктивність 200 кг/год[23]
Ц-35	Циклон	1	Входить до комплектації розпилювальної сушарки
К-36	Конвеєр	1	Конвеєр стрічковий харчовий горизонтальний ЛТ-5-400 Виробник 4BUILD Energy TAPE (Україна) довжина 5 м, ширина 400 мм, потужність 1,5 кВт [24]
ВД-37	Ваговий дозатор	1	Ваговий дозатор ФС-75 Виробник Техномашстрой (Україна) Робочий діапазог 0,15 - 40 кг Похибка дози 1% [25]
З-38 З-41	Збірник для етанолу та збірник для фракції з полісахаридами	2	Збірник об'ємом 50 м ³ JZ-50000 Виробник Guangdong Jinzong Machinery Co., Ltd., Ltd. (Китай); GJМатеріал нержавіюча сталь SS316 L [1]
ОД-39	Об'ємний дозатор	1	Об'ємний дозатор LF-DL-1000 Виробник Zhengzhou Bate Melt Pumps Co., Ltd. (Китай); Продуктивність 200-2000 л/год Матеріал нержавіюча сталь SS316 L [26]
Н-40 Н-42 Н-44 Н-60 Н-62	Перестальтичний насос для перекачування етанолу до та від З-41, для перекачування п-гексану до Р-61 та для перекачування екстрагента від Р-61	5	Хімічно стійкий перестальтичний насос Виробник Botou Honghai Pump Co., Ltd. (Китай); Продуктивність 0.6-42 м ³ /год, Потужність 0.3-18 кВт Робочий тиск 0,6-1,0 МПа [27]
НФ-43	Нутч-фільтр	1	Нутч-фільтр UNFCD 3200 Виробник: Jiangsu Nanpu Mechanical Technology Co., Ltd (Китай);Робочий об'єм 8 м ³ ; Фільтрувальна поверхня 8 м ² Матеріал нержавіюча сталь SUS316L; Габаритні розміри 1700x800x2700 мм [28]

ПВУ-46	Вакуум плівковий випарник з перемішуванням для випарювання етанолу з полісахаридів	1	Вакуум випарник з перемішуванням плівки ZN-200 Виробник: Wenzhou Chinz Machinery Co., Ltd. (Китай); Продуктивність 200 л/год; Ступінь вакууму -0.06 ~ -0.08 МПа Робоча температура 0-100 °С; Матеріал нержавіюча сталь SUS316L; Габаритні розміри 1700x800x2700 мм [29]
P-48	Реактор змішувач для приготування розчину сульфатної кислоти	1	Реактор змішувач 2 м ³ Виробник Weihai Borui Chemical Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь SS316 L [32]
P-52	Реактор змішувач для приготування розчину натрій гідроксиду для нейтралізації кислоти	1	Реактор змішувач 3 м ³ Виробник Shanghai Chengdong Technology Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 316 L [30]
H-53	Перестальтичний насос для перекачування розчину натрій гідроксиду для нейтралізації кислоти	1	Хімічно стійкий перестальтичний насос Gaodetec GH series Gaode Equipment Co., (Китай); Потужність 3,5 кВт; Продуктивність 8 м ³ /год; [10]
H-54	Відцентровий насос для перекачування нейтралізованого гідролізату до С-55	1	Відцентровий насос YONGSHUN IS65-50-125 Виробник Baoding Yongshun Pump Industry Co., Ltd. (Китай); Потужність 1,54 кВт; Продуктивність 15 м ³ /год; [31]
3-57	Збірник для вологих залишків біомаси	1	Збірник об'ємом 2 м ³ Виробник Weihai Borui Chemical Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь SS316 L [32]
H-56 H-58 H-82	Перестальтичний насос для перекачування вологих залишків біомаси	3	Перестальтичний насос Виробник Botou Honghai Pump Co., Ltd. (Китай); Продуктивність 1,25 м ³ /год [33]
3-59 3-67 3-72	Збірник для n-гексану, для феофорбиду з етанолом від ЕК-63 та ЕК-65, та для фази n-гексану та ліпідів	3	Збірник 10 м ³ Виробник Wenzhou Ace Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь SS316 L [7]

P-61	Реактор змішувач для приготування екстрагенту	1	Реактор змішувач 20 м ³ Виробник Laizhou New Hongda Chemical Machinery Co (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 316 L [9]
ЕК-63 ЕК-65	Екстракційна колона	2	Промислова екстракційна колона TQB-13 та TQB-10 Виробник Sanda Industrial Co., Ltd. (Китай); Об'єм 14 м ³ та 11 м ³ Матеріал нержавіюча сталь SS316 L [11]
Н-64 Н-66 Н-68 Н-73	Відцентровий насос для перекачування фаз від ЕК-63 та ЕК-65 для перекачування етанолу з феофорбідом від З-67 до ПВУ-69 та для перекачування фази n-гексану та ліпідів	4	Хімічний відцентровий насос QNB-G-40022EAL-SSH5V38AGABS-3801 Виробник Qeehua (Китай); Матеріал армований скловолокном поліпропілен; Потужність 1,5 кВт; Продуктивність 308 л/хв [34]
ПВУ-69	Вакуум плівковий випарник з перемішуванням	1	Вакуум випарник з перемішуванням плівки CHINZ Виробник: Wenzhou Chinz Machinery Co., Ltd. (Китай); Продуктивність 4 м ³ /год; Робоча температура 0-100 °С; Матеріал нержавіюча сталь SUS316L; [35]
ВСШ-71	Вакуум сушильна шафа	1	Вакуум сушильна шафа FZG-20 Виробник Changzhou Vole Tech Co., Ltd. (Китай); Тиск в шафі -0.1 Мпа; Робоча температура 35-150 °С Розміри (довжина*ширина*висота) 1924*2500*1513 мм; Матеріал нержавіюча сталь SS304L [36]
ПВУ-74	Вакуум-випарний апарат з стікаючою плівкою для випарювання залишків n-гексану з ліпідів	1	Вакуум-випарний апарат з стікаючою плівкою Виробник: Geling Environmental Technology Co., Ltd. (Китай); Продуктивність 4 м ³ /год; Робоча температура 0-100 °С; Матеріал нержавіюча сталь SUS316L; [37]

P-76	Реактор змішувач для приготування каталізаторного розчину	1	Реактор змішувач 50 л Виробник Jiaozuo Double Eagle Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 304 L [18]
H-77 H-80	Відцентровий насос для перекачування каталізаторного розчину від P-76 та для перекачування промивного розчину від P-78	2	Відцентровий насос для хімії Виробник Qeehua (Китай); Матеріал поліпропілен; Потужність 0,02 кВт; Продуктивність 27,5 л/ хв[38]
P-78	Реактор змішувач для приготування промивного розчину	1	Реактор змішувач 200 л Виробник Wenzhou Aowei Machinery Co., Ltd. (Китай); Матеріал нержавіюча сталь 316 L [22]
P-81	Реактор змішувач для виробництва біодизелю	1	Реактор змішувач 1 м ³ Виробник Weihai Borui Chemical Machinery Co., Ltd. (Китай) [13]
3-84	Збірник для залишків біомаси від ЕК-65	1	Збірник 2000 л Виробник Laizhou New Hongda Chemical Machinery Co., Ltd. (Китай); матеріал нержавіюча сталь 316 L [39]
H-85 H-87	Відцентровий насос для перекачування залишків біомаси від 3-84 до ПВУ-86	2	Відцентровий насос Виробник LEO (Китай); Потужність 0,3 кВт; Висота напору 30 м; Матеріал нержавіюча сталь; Продуктивність 2,4 м ³ /год [40]
ПВУ-86	Вакуум-випарний апарат з стікаючою плівкою для випарювання залишків розчинників з залишків біомаси	1	Вакуум-випарний апарат з стікаючою плівкою Виробник: Shanghai Minjie Machinery Co., Ltd. (Китай); Продуктивність 1000 л/год; Робоча температура 45-85 °С; Матеріал нержавіюча сталь SS304; Габаритні розміри 4500*3500*3800 мм [41]
СП-88	Система подачі субстратів	1	Частина біометанового заводу
М-89	Метантенк	1	Частина біометанового заводу
СПББ-90	Система покращення біогазу до біометану	1	Частина біометанового заводу
РВ-91	Роторний вакуум випарник	1	Роторний вакуум випарник RE-3002 Виробник: (Китай) [42]

Примітка:

- [1] https://jinzongmachinery.en.made-in-china.com/product/cCdJZkSMKwhb/China-External-Half-Coil-Limpet-Reactor-50000L-for-Acrylic-Emulsion-Emulsion-Polymer-PVA-Production-Line.html?header_search_page=lv
- [2] https://www.alibaba.com/product-detail/20-M3-h-Hose-Peristaltic-Pumps_1601567107663.html
- [3] https://www.alibaba.com/product-detail/Automatic-Industrial-Sludge-Dewatering-Systems-Belt_1601258108573.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.485767afHqK03d&priceId=f202f91b5d5c4bd098d2cc924c927ea4
- [4] https://www.alibaba.com/product-detail/8000L-Stirred-Non-Ferrous-Metal-Cladding_1601140834232.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.77c613a0fUxlmz&priceId=2203dc23f40341cca1ade85b944ac017
- [5] https://www.alibaba.com/product-detail/Customized-Portable-Peristaltic-Foamed-Concrete-Pump_60635564399.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.1e5f67afVHDdKi&priceId=4e80270e8c9c4b7c97cc99f0f3956283
- [6] https://www.alibaba.com/product-detail/Automatic-2-Phase-Disc-Stack-Micro_1601371620583.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.58c867afhYriZj&priceId=af002e338fa1478badd606cc0fa4208
- [7] https://www.alibaba.com/product-detail/10000-Liter-Industrial-Jacketed-Stainless-Steel_1601573271826.html?spm=a2700.find_similar.normal_offer.d_title.55c95f932PsmOD
- [8] https://www.alibaba.com/product-detail/Nice-Quality-Liquid-Peristaltic-Pump-for_1600605189637.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.7a1e67afEi3O8U&priceId=b69784a41c40439ca3443ae6046eb936
- [9] https://www.alibaba.com/product-detail/Chemical-Reactor-20m3-with-Turbin-with_1600283514892.html
- [10] https://www.alibaba.com/product-detail/High-Efficiency-Large-Output-Industrial-Hose_1601187790225.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.3bc267afCbolo4&priceId=fa83893438b3402c85de505cc59ff790
- [11] <https://sanda-industrial2017.en.made-in-china.com/product/wSIJdHVvEIpa/China-Extractor-Vessel-Tank-Column-for-Herbs-Extraction.html>
- [12] <https://ovs.com.ua/ua/nasos-tsentrobegnyj-saer-saer-m-400v-1-5-kvt-10-m3-chas-52-m?srltid=AfmBOoqoUSIUFIYBSWMAxAgAk7Bc9dvVyh3USx6heEgMwVuu-IWE8O8Q>
- [13] https://www.alibaba.com/product-detail/1m3-Industrial-Monel-High-Temperature-Reactor_1600351588769.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.5a2f67afKOpX0S&priceId=c78a7918bc404da6bf76b1475fae65bc
- [14] https://www.alibaba.com/product-detail/Ace-360M3-H-100M-Series-Horizontal_1601620460300.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.333167af6ubliI&priceId=8d3315e7f8ca47ea89117b953b6f49db
- [15] https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-Hot-Sale-Spirulina-Harvesting-Continuous_1601610501048.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.361667afSpqiEQ&priceId=91b63dc2c10840a0b5ee0d10c9ff03ac
- [16] https://www.alibaba.com/product-detail/Heating-Reactor-Jacket-300L-Double-Jacket_1601367721798.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.3b8f67afKXoN61&priceId=38a68ad7de4547cd945e81290f12036d
- [17] https://www.alibaba.com/product-detail/Falling-Film-Vacuum-Concentrated-Traditional-Chinese_1601417046565.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.2f1767afA11Nr1&priceId=4d26504bbebf44a098fc8a95f6717998
- [18] https://www.alibaba.com/product-detail/100L-600L-800LStainless-Steel-Industrial-Single_1601044027870.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.39c567afiWzg5p&priceId=5b2dd264e6794b998ff35594b5cf754e
- [19] https://gastropartner.ua/dozator-dlia-vody-sdm-50-s-kumkaya/15964/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Feed_1&gad_source=1&gad_campaignid=23101719005&gbraid=0AAAAAapiKoVvDO6pDfCHnFBjJLa6LPxIJD&gclid=Cj0KCQiArOvIBhDLARIsAPwJXOZABefaZSsRDwg6NnDiAdfqqSYiBfQSG1w3Is06ldMmg46XPGNktb4aAgn9EALw_wcB
- [20] https://www.alibaba.com/product-detail/2-Phase-Solid-Liquid-Separation-Continuous_1601218801365.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.58c867afhYriZj&priceId=af002e338fa1478bad606ccc0fa4208
- [21] <https://tplus.com.ua/peristaltichny-nasos253d>
- [22] https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-Price-200L-20000L-Liquid-Chemical_1600909389349.html?spm=a2700.7724857.0.0.69c66f2c4dXiid
- [23] <https://www.griffinmachinery.com/uk/відцентрова-розпилювальна-сушарка/>
- [24] <https://4build.biz/konvejer-lentochnyj-pishevoj-gorizontalnyj-lt-5-400>

[25] https://tms.ck.ua/ua/p1258432678-vesovoj-dozator.html?source=merchant_center&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=T2_Lead_PM_210525&utm_term=|&utm_device=c&gad_source=1&gad_campaignid=22726924977&gbraid=0AAAAA_pIGUt3mDCRFYq29Bp5rIUxN5ZvE&gclid=Cj0KCQiArOvIBhDLARIsAPwJXOYMJEQhSEiy3eL8v96wZroNuTP-m710pNFyygacg6lbhxhuXtxC570aAgK8EALw_wcB

[26] https://www.alibaba.com/product-detail/Volumetric-Feeder-for-Masterbatch-Liquid_60368582848.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.539067afqOQN37&priceId=77a3946555e4471c899ad421b015afc0

[27] https://www.alibaba.com/product-detail/Nice-Quality-Liquid-Peristaltic-Pump-for_1600605189637.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.7a1e67afXGluGl&priceId=d6364bd9ba2b4262809f4aa93abb38ba

[28] https://www.alibaba.com/product-detail/Agitated-Nutsche-Filter-and-Dryer-Machine_62402925776.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.628a67afbtP1QG&priceId=4357a6939c624a7285b58cf9890f9d2f

[29] https://www.alibaba.com/product-detail/Zn-500-Multi-Effect-Vacuum-Milk_1600527864547.html?spm=a2700.details.you_may_like.13.9f7c95aadJ4iSi

[30] https://www.alibaba.com/product-detail/Custom-High-Quality-Stainless-Steel-Reactor_1601462405929.html?spm=a2700.7724857.0.0.5c80f5e2hZK18k

[31] https://www.alibaba.com/product-detail/15m3-H-Flow-21-8m-Head_1601422280212.html?spm=a2700.7724857.0.0.1bc46077fR2UB7

[32] https://www.alibaba.com/product-detail/1000L-5000L-Chemical-Industrial-Continuous-Tubular_1600251663910.html?spm=a2700.details.you_may_like.1.1e115a26E2PT2v

[33] https://www.alibaba.com/product-detail/High-Efficiency-Peristaltic-Pump-High-Flow_62104630363.html?spm=a2700.details.you_may_like.1.5afe1263DriBc1

[34] <https://bts.net.ua/eng/pumping-equipment-distillery/acid-pumps-sip/nasos-kh-m-chniy-qhb-g-40022eal-ssh5v38agabs-380l-308l-min-16m-380v-v-dcentroviy-samovsmoktuyuchiy/>

[35] https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Industrial-Agitated-Type-Vacuum_1600277360051.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.7a2713a07Lyjle&priceId=394f36c05e074ef486f3b7f80780617e

[36] https://www.alibaba.com/product-detail/48-Trays-Drying-Oven-With-Vacuum_1600599736342.html?spm=a2700.7724857.0.0.2de84c98jkg2kx

[37] https://www.alibaba.com/product-detail/Oil-Extraction-and-Distillation-Ethanol-Recovery_1601575201789.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.1a4a67afkplJWw&priceId=66700a3fe178499ead56da40df0b8914

[38] https://pumpcentre.com.ua/ua/nasos-dlya-khimii-md-f-202sae-5v22ays-pp-27l-min-3m-220v/?gclid=Cj0KCQiArOvIBhDLARIsAPwJXOazUKcd133Wp4Dc9oi1dQ1Uouozql9oBtOniOeyP8ukBNU7oUoc6caAuyZEALw_wcB&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=K2-InshiNasosy-PidZamovlennya-SO-260925&utm_term=

[39] https://www.alibaba.com/product-detail/2000-liters-Factory-Price-Industrial-Batch_1600708660741.html

[40] https://ovs.com.ua/ua/nasos-tsentrobegnyj-saer-saer-m-400v-1-5-kvt-10-m3-chas-52-m?srsId=AfmBOopD_CvGoMGqO-AHYNN4tG9eLu4O9p312LQlhaOz2DT2rKCYwbGu

[41] https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-1000L-Vacuum-Sdr-Ethanol-Waste_1601619068871.html?spm=a2700.7724857.0.0.2ad8534aaTUexE

[42] <https://labxiangyi.en.made-in-china.com/product/FCIQHxdAEXkV/China-Re-3002-30L-Rotary-Evaporator-with-Bath.html>

РОЗДІЛ 6. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ

Технологічна схема технології модернізації біометанових заводів для виробництва цінних продуктів з водоростей наведена в додатку. Технологічна схема включає стадії допоміжних робіт, а також стадії технологічного процесу.

ДР 1 Приготування наважок допоміжних речовин на технологічний процес

ДР 1.1 Приготування наважки амоній сульфату

На технічних вагаг з точністю до 2-го знака зважують 4 112,46 кг амоній сульфату в поліетиленові мішки по 50 кг. Поліетиленові мішки затягують стяжками та обов'язково маркують з зазначенням назви, ваги, дати та часу, виконувця. Готову наважку передають до стадії ТП 7.1.

ДР 1.2 Приготування наважки ферум(III) сульфату

На технічних вагаг з точністю до 2-го знака зважують 22,03 кг ферум(III) сульфату в поліетиленовий мішок на 50 кг. Поліетиленовий мішок затягують стяжками та обов'язково маркують з зазначенням назви, ваги, дати та часу, виконувця. Готову наважку передають до стадії ТП 5.2.

ДР 1.3 Приготування наважки целюлази

На технічних вагаг з точністю до 2-го знака зважують 80,27 кг целюлази в поліетиленові мішоки на 50 кг. Поліетиленові мішки затягують стяжками та обов'язково маркують з зазначенням назви, ваги, дати та часу, виконувця. Готову наважку передають до стадії ТП 4.1.

					НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ						
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 6. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Розроб.	Сидоренко М.Р.									82	136
Перевір.	Стабніков В.П.										
Реценз.											
Н. Коитр.											
Затверд.	Стабніков В.П.				Кафедра БТМ						

ДР 2 Приготування допоміжних розчинів на технологічний процес

ДР 2.1 Приготування 0,8 М розчину сульфатної кислоти для стадії кислотного гідролізу

У реактор-змішувач Р-48 за допомогою об'ємного дозатора ОД-49 додають 1 699,28 л дистильованої води, вмикають перемішувальний пристрій на швидкості 60 об/хв і обережно доливають технічну сульфатну кислоту 44%. Очікують 30 хв до повного перемішування і передають на стадію ТП 10.1

ДР 2.2 Приготування 1 М розчину натрій гідроксиду для нейтралізації кислоти

У реактор-змішувач Р-52 за допомогою об'ємного дозатора ОД-49 додають 2 593,2 л дистильованої води, вмикають перемішувальний пристрій на швидкості 60 об/хв. На технічних вагах зважують 105,71 кг натрій гідроксиду і переносять до реактора-змішувача Р-52. Очікують 30 хв до повного розчинення і передають на стадію ТП 10.2

ДР 2.3 Приготування екстрагенту

У реактор-змішувач Р-61 за допомогою перестальтичного насосу Н-60 зі збірника 3-59 дозують 8 936,71 л п-гексану та за допомогою перестальтичного насосу Н-40 зі збірника 3-38 дозують 8 936,71 л етанолу. Вмикають перемішувальний пристрій на швидкості 60 об/хв і чекають 30 хв до повного перемішування. Отриманий екстрагент передають на стадії ТП 11.1 та ТП 11.3.

ДР 2.4 Приготування 1,2 % розчину натрій гідроксиду для процесу трансестерифікації

У реактор змішувач Р-76 з використанням мірного циліндру на 1 л заливають 26,8 л метанолу, вмикають перемішувальний пристрій на швидкості 60 об/хв і частинами додають наважку натрій гідроксиду 1,17 кг, яку зважують на лабораторних вагах з точністю до 2-го знака. Перемішування здійснюють 30 хв до повного розчинення натрій гідроксиду. Отриманий розчин передають на стадію ТП 13.2.

ДР 2.5 Приготування 1 % розчину оцтової кислоти для очищення біодезелю.

У реактор-змішувач Р-78 за допомогою об'ємного дозатора ОД-79 додають 106,31 л дистильованої води, вмикають перемішувальний пристрій на швидкості 60 об/хв. За допомогою мірного циліндра на 1 л та піпетки на 10 мл відміряють 1,07 л крижаної оцтової кислоти і вносять до реактора-змішувача Р-78. Очікують 30 хв до повного перемішування і передають на стадію ТП 13.4.

ТП 3 Зберігання культуральної рідини

ТП 3.1 Підтримання умов для зберігання культуральної рідини

Культуральну рідину об'ємом 146 885,63 л зберігають у реакторах-змішувачах Р-1, Р-2, Р-3 об'ємом 50 м³. Зберігають протягом 2-3 доби за температури 4-6 °С, для цього в сорочку реактора постійно подають холодну воду.

ТП 4 Збирання біомаси

ТП 4.1 Додавання флокулянту

До реакторів Р-1, Р-2, Р-3 засипають по 1 370,82 кг наважки ферум(III) сульфату від ДР 1.2. Вмикають перемішувальні пристрої. Перемішують до повного розчинення при 90 об/хв.

ТП 4.2 Гравітаційне осадження та збір біомаси

Далі вимикають перемішування і дають флокулам осісти протягом 40 хв. Після цього 1/3 від всього об'єма за допомогою перестальтичних насосів Н-2, Н-4, Н-6 перекачують до стрічкового фільтр преса СФП-7, де суспензію розділяють на вологу біомасу, яку передають на стадію ТП 5.1 та залишок, який разом з залишком з реакторів повертають на рецикл в блоки культивування.

ТП 5 Попередня обробка біомаси

ТП 5.1 Термічна обробка

Вологу біомасу водоростей від ТП 4.2 переносять до реактора-змішувача Р-8. Після цього Р-8 нагрівають до 90 °С за допомогою гострої пари, яку подають в сорочку реактора, та витримують протягом 2,5 години. Далі реактор охолоджують за допомогою холодної води до кімнатної температури.

ТП 5.2 Ферментативна обробка

Далі до реактора-змішувача Р-8 додають наважку целюлази від ДР 1.3 вмикають перемішувальні пристрій з швидкістю 60 об/хв і витримують 4 години. Далі залишки біомаси перестальтичним насосом Н-9 передають на стадію ТП 6.1.

ТП 6 Відділення обробленої біомаси

ТП 6.1 Центрифугування обробленої біомаси

Залишки біомаси від ТП 5.2 подають на сепаратор С-10, де при 5000 об/хв розділяють їх на супернатант, який передають до стадії ТП 7.1, та преципітат, який за допомогою перестальтичного насосу Н-11 передають на стадію ТП 10.1

ТП 7 Трифазне розділення супернатанту

ТП 7.1 Додавання амоній сульфату до супернатанту

До супернатанту від ТП 6.1 додають наважку амоній сульфату від ДР 1.1, добре перемішують при 80 об/хв та за допомогою перестальтичного насосу Н-13 переносять до ЕК-16 та ЕК-18.

ТП 7.2 Додавання t-бутанолу

Після додавання супернатанту та амоній сульфату до ЕК-16 та ЕК-18 зі збірника З-14 дозують за допомогою перестальтичного насосу Н-15 n-гексан. При цьому вмикають перемішування з амплітудою 80 коливань на хв.

ТП 7.3 Відстоювання та зливання фаз

Після перемішування утвореній суміші дають відстоятись та розділитись, далі за допомогою відцентрових насосів Н-17 та Н-19 по чергово переносять нижню фазу з полісахаридами до З-41, проміжну фазу з білками до З-20, а верхню фазу t-бутанолу повертають до З-14.

ТП 7.4 Відділення білків та амінокислот

Проміжну фазу з білками зі збірника З-20 за допомогою відцентрового насосу передають до сепаратора С-22 на розділення при 10 000 об/хв. Отримані забруднені білки передають перестальтичним насосом Н-23 до З-24 на стадію ТП 8.1. А отриманий супернатант відправляють на утилізацію.

ТП 8 Виробництво білково-амінокислотного концентрату

ТП 8.1 Випарювання залишків t-бутанолу

Забруднені білки від стадії ТП 7.4 зі збірника З-24 відцентровим насосом Н-25 перекачують до вакуум випарної установки з стікаючою плівкою ПВУ-26, де при умовах $P=0,04$ МПа; $t=40$ °С двостадійно видаляються залишки t-бутанолу. Випари t-бутанолу відправляють до теплообмінника на регенерацію та повертають до З-14. Білково-амінокислотний концентрат за допомогою відцентрового насоса подають до збірника З-27.

ТП 8.2 Промивання білків та амінокислот водою

У збірник З-27 з концентратом додають за допомогою об'ємного дозатора ОД-28 воду питну. Та вмикають перемішувальний притрій зі швидкістю 80 об/хв. Далі за допомогою відцентрового насоса Н-29 суспензію білків та амоній сульфату подають на сепаратор С-30.

ТП 8.3 Відділення білків та амінокислот

Отриману суспензію білків, амінокислот та амоній сульфату розділяють на сепараторі С-30 при 10 000 об/хв. Супернатант відправляють на утилізацію, а вологий білково-амінокислотний концентрат відправляють за допомогою перестальтичного насосу Н-31 до збірника З-32

ТП 8.4 Сушіння білково-амінокислотного концентрату

Вологий білково-амінокислотний концентрат зі збірника З-32 за допомогою перестальтичного насосу Н-33 подають до розпилювальної сушарки РС-34, де при температурі 120°С та часу контакту 3 хв білково-амінокислотний концентрат висушують до вологості 10%. Після цього висушений білково-амінокислотний концентрат за допомогою конвеєра К-36 подаються до вагового дозатора ВД-37.

ТП 9 Виділення полісахаридів

ТП 9.1 Осадження полісахаридів

До отриманої фази з полісахаридами від ТП 7.3 у збірнику З-41 дозують за допомогою перестальтичного насосу Н-40 етанол від збірника З-38 вмикають

перемішувальний пристрій з швидкістю обертів 80 об/хв на 30 хв. Після цього вміст подають перестальтичним насосом Н-42 до нутч-фільтру НФ-43.

ТП 9.2 Відділення полісахаридів

На цій стадії суміш етанолу та осаджених полісахаридів фільтрують через нутч-фільтр, отриманий етанол повертають назад за допомогою перестальтичного насоса Н-44 до збірника З-38, а отримані полісахариди за допомогою перестальтичного насосу відправляють Н-45 до вакуум випарної установки з перемішуванням плівки ПВУ-46.

ТП 9.3 Випарювання та регенерація етанолу

Залишки етанолу які містяться у полісахаридах, які отримані з минулої стадії. Випарюють на вакуум випарній установці з перемішуванням плівки ПВУ-46 при наступних умовах $P = 0,04$ МПа; $t = 40$ °С. Отримані випари етанолу конденсують і направляють до З-38, а полісахариди направляють до стадії ТП 14.2

ТП 10 Кислотний гідроліз преципітату

ТП 10.1 Кислотний гідроліз

До отриманих залишків біомаси у Р-51 від ТП 6.1 додають розчин 0,8 м сульфатної кислоти від ДР 2.1, далі вмикають перемішувальний пристрій з частотою 60 об/хв протягом 30 хв. Після цього перемішування зупиняють і нагрівають реактор до температури 60 °С за допомогою теплої води, яку подають подають в сорочку, та витримують 2 години.

ТП 10.2 Нейтралізація кислоти

Після закінчення кислотного гідролізу до реактора- змішувача Р-51 додають розчин 1 М натрій гідроксиду від ДР 2.2 для нейтралізації кислоти та перемішують при 80 об/хв протягом 30 хв. Після цього нейтралізований гідролізат направляють за допомогою відцентрового насоса Н-54 до сепаратора С-55.

ТП 10.3 Відділення залишків біомаси

Отриманий нейтралізований гідролізат розділяють на сепараторі С-55 при 7000 об/хв. Отриманий супернатант відправляють на утилізацію, а отримані

залишки біомаси направляють за допомогою перестальтичного насосу Н-56 до збірника З-57.

ТП 11 Двофазна екстракція залишків біомаси

ТП 11.1 Екстракція

Від збірника З-57 за допомогою перестальтичного насосу Н-58 до екстракційної колони ЕК-63 направляють залишки біомаси, а також за допомогою перестальтичного насосу Н-62 до ЕК-63 дозують екстрагент від ДР 2.3. та вмикають перемішування при 60 об/хв протягом 30 хв.

ТП 11.2 Відстоювання та зливання фаз

Після перемішування екстракційну колону залишають для відстоювання на 2 години, а потім за допомогою відцентрового насоса Н-64 послідовно зливають нижню фазу з феофорбідом та етанолом до З-67, проміжну фазу з залишками біомаси до ЕК-65, а верхню фазу ліпідів та п-гексану до З-72.

ТП 11.3 Повторна екстракція

Від екстракційної колони ЕК-63 за допомогою відцентрового насосу Н-64 до екстракційної колони ЕК-63 направляють залишки біомаси на повторну екстракцію, а також за допомогою перестальтичного насосу Н-62 до ЕК-63 дозують свіжий екстрагент від ДР 2.3. та вмикають перемішування при 60 об/хв протягом 30 хв.

ТП 11.4 Відстоювання та зливання фаз

Після перемішування екстракційну колону залишають для відстоювання на 2 години, а потім за допомогою відцентрового насоса Н-66 послідовно зливають нижню фазу з феофорбідом та етанолом до З-67, проміжну фазу з залишками біомаси до збірник З-84, а верхню фазу ліпідів та п-гексану до З-72.

ТП 12 Виробництво феофорбїду

ТП 12.1 Випарювання та регенерація етанолу

Отриману фазу феофорбїду зі збірника З-67 за допомогою відцентровго насосу Н-68 подають на вакуум випарну установку з перемішуванням плівки ПВУ-67, де проводять випарювання етанолу при наступних умовах $P = 0,04$ МПа; $t = 40$ °С.

Отримані випари етанолу направляють на регенерацію, а після неї за допомогою перестальтичного насосу Н-70 до З-38.

ТП 12.2 Сушіння феофорбиду

Отриманий концентрат феофорбиду розкладають на полчки та напралють до вакуум сушильної шафи СШ-71, де висушують його до 10% вологості. Отриманий феофорбід направляють на пакування до стадії ПМВ 15.2.

ТП 13 Виробництво біодизелю

ТП 13.1 Випарювання та регенерація n-гексану

Отриму фазу ліпідів та n-гексану від ТП 11.2 та ТП 11.4 за допомогою відцентровго насосу Н-73 зі збірника З-72 направляють до вакуум випарної установки з стікаючою плівкою ПВУ-74. Тут відбувається видалення n-гексану при умовах $P= 0,04$ МПа; $t= 40$ °С. Випари n-гексану подаються на регенерацію, а отриману рідину відправляють до З-59. Отримані ліпіди направляють відцентровим насосом Н-75 до Р-81.

ТП 13.2 Трансестерифікація

До ліпідів в З-59 додають каталізаторний розчин від ДР 2.4 за допомогою відцентрового насосу Н-77. Далі вмикають перемішувальний пристрій при 300 об/хв та нагріваю реактор до 60 °С за допомогою подачі гарячої води в сорочку реактора. Перемішування здійснюють 30 хв.

ТП 13.3 Відокремлення та очищення сирого гліцерину

Після перемішування реактор-змішувач Р-81 залишають на відстоювання до розділення фаз, після обережно зливають фазу сирого гліцерину з залишками метанолу та відправляють на лабораторний роторний вакуум випарник РВ-91 за допомогою перестальтичного насоса Н-82, де випарюють залишки метанолу, які напрваляють на повторний цикл, а отриманий технічний гліцерин переливають у пластикову тару та відправляють на подальшу реаліацію.

ТП 13.4 Очищення біодезеля

До брудного біодизелю в Р-81 додають за допомогою відцентрового насоса Н-80 промивний розчин отриманий від ДР 2.5. Далі за допомогою мішалки вміст

ретельно перемішують при 150 об/хв протягом 30 хв. Після цього до реактора додають 322,15 л дистильованої води і повторюють перемішування.

ТП 13.5 Видалення вологи

Після дають системі відстоятись протягом 2 годин і після обережно зливають промивний розчин за допомогою перестальтичного насосу Н-82. Щоб остаточно видалити залишки води. Реактор нагрівають до 150 °С за допомогою подачі гарячої пари в сорочку реактора та витримують 50 хв. Після цього реактор охолоджують і очищений біодизель перекачують до збірника З-83, де він зберігається для використання на власні потреби.

ТП 14 Виробництво біометану

ТП 14.1 Випарювання розчинників з залишків біомаси

Отриману проміжну фазу з залишками біомаси зі збірника З-84 за допомогою відцентрового насоса Н-85 подають до вакуум випарної установки з стікаючою плівкою ПВУ-86. Тут відбувається видалення залишків розчинників при умовах $P=0,04$ МПа; $t=40$ °С. Випари розчинників подаються на регенерацію, а отриману рідку суміш розчинників відправляють на утилізацію. Отриманий вологі щалишки біомаси подаються до СП-88.

ТП 14.2 Анаеробне розкладання залишків біомаси

Отримані залишки біомаси від ТП 14.1 та полісахариди від ТП 9.3 змішують з іншою сировиною, для досягнення оптимального співвідношення С:N 20-30, та рідкою фракцією дигестату в системі подачі сировини СП-88 та за допомогою шнека подається до метантенку М-89 на анаеробне розкладання.

ТП 14.3 Очищення та перетворення біогазу на біометану

Отриманий біогаз по трубопроводу направляють до системи перетворення біогазу на біометану СПББ-90, де спершу біогаз стискається за допомогою компресора далі проходить через чіллер, де з нього видаляється волога. Після цього він проходить через H_2S -абсорбери з активованим вугіллям. Далі проходять через мембрани під високим тиском, де відбувається розділення біометану та

вуглекислого газу. А після цього біометан додатково стискають на компресорі, щоб подати до ГРМ або ГТС.

ПМВ 15. Пакування, маркування, цільових продуктів

ПМВ 15.1. Пакування та маркування висушеного білково-амінокислотного концентрату

Отриманий висушений білково-амінокислотний концентрат від ТП 8.4 фасують у непрозорі пластикові банки з наклеєною етикеткою по 3 кг за допомогою вагового дозатора ВД-37, а далі щільно закручують кришкою та упаковують у коробки, які надалі відправляють на склад для карантинного зберігання.

ПМВ 15.2. Пакування та маркування висушеного феофорбід

Висушений феофорбід від ТП 12.2 вручну з використанням технічних вагів з точністю до 2-го знака після коми фасують по 250 г у чорні поліетиленові пакети з наклеєною етикеткою, де зазначена основна інформація про продукт, а потім запаюють їх за допомогою вакуумно-пакувальної машини. Отримані пакети складають у коробку з гофрокартону для зберігання.

ПМВ 15.3. Зберігання та відвантаження біодизелю

Очищений біодизель від ТП 13.5 зберігають у збірнику З-83 при температурі від 5 до 20 °С, забезпечуючи герметичність, а також відсутність вологи та повітря ззовні.

РОЗДІЛ 7. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА

7.1 Підбір методів контролю виробництва

7.1.1 Альгологічний контроль

Альгологічний контроль проводять шляхом мікроскопіювання та посіву зразка на щільне поживне середовище. З метою виявлення контамінантних видів водоростей та ціанобактерій виконують посів методом виснажуючого штриха на середовища: BG-11 для виявлення ціанобактерій та водоростей і паралельно ВВМ для виявлення водоростей.

Для остаточної перевірки здійснюють мікроскопіювання колоній. Морфологія *Scenedesmus abundans* дуже особлива: клітини створюють характерні скупчення з 4 клітин, розташованих лінійно; тіло клітини яйцеподібної або еліпсоїдної форми, довжиною 9-20 мкм, шириною 3-5 мкм. Зовнішні клітини з довгими шипами на обох кінцях довжиною 6-8 мкм і короткими шипами на зовнішній стороні довжиною 3-5 мкм, а внутрішні клітини іноді мають короткий шип на обох кінцях (Microbial Digital Specimen Archives).



Рис. 7.1 Світлове мікроскопіювання *Scenedesmus abundans*
(Microbial Digital Specimen Archives)

					НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ					
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 7. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА					
Розроб.	Сидоренко М.Р.							Літ.	Арк.	Архивів
Перевір.	Стабніков В.П.								92	136
Реценз.								Кафедра БТМ		
Н. Контр.										
Затверд.	Стабніков В.П.									

7.1.2 Визначення вмісту сухих речовин та вологи

Для визначення вмісту сухих речовин та вологи в біомасі, напівпродуктах та цільових продуктах використовують термогравіметричний метод (ДСТУ ISO 6496:2005, ДП «УкрНДНЦ»).

Принцип методу: цей метод базується на визначенні різниці мас досліджуваного зразка до висушування та після висушування до постійної маси.

Матеріали та обладнання:

- Аналітичні ваги з точністю до 3-го знака;
- Сушильна шафа;
- Порцелянові тиглі;
- Щипці для тиглів;
- Ексикатор.

Хід виконання: Спершу в сушильній шафі при 105 °С висушують 3 тиглі до постійної маси, далі їх зважують (m_1). Після цього у зважені тиглі, не таруючи ваги, з 5 довільних точок відбирають по 5 г зразка (m_2) та ставлять на висушування при 105°С до постійної маси. Після висушування тиглі та зразки знову зважують (m_3). Далі вміст сухих речовин (%CP) та вологи (%W) визначають за формулами:

$$\%CP = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100$$

та

$$\%W = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} * 100$$

де m_1 – маса висушеного тигля, [г]; m_2 – маса висушеного тигля та вологого зразка, [г]; m_3 – маса висушеного тигля та висушеного зразка, [г];

7.1.3 Визначення зольності та сухих органічних речовин

Визначення зольності та сухих органічних речовин у біомасі, залишках біомаси та цільових продуктах проводять термогравіметричним методом (ДСТУ 8454:2015, ДП «УкрНДНЦ»)

Принцип методу: Висушений зразок зважують, а потім спалюють у муфельній печі, отриману золу зважують. Вміст золи визначають шляхом порівняннi маси до спалювання та після спалювання.

Матеріали та обладнання:

- Муфельна піч;
- Ступка з товкачиком;
- Сито з діаметром пор 0,25 мм;
- Щипці для тиглів;
- Порцелянові тиглі;
- Аналітичні ваги з точністю до 3-го знака;
- Ексикатор.

Хід виконання: Спершу порцелянові тиглі прожарюють у муфельній печі за температури 800°C протягом 2 годин, далі їх охолоджують до кімнатної температури та додатково витримують в ексикаторі протягом 30 хв і зважують (m_1). Повторне прожарювання проводять при такій самій температурі протягом 1 год, поки різниця між двома попередніми зважуваннями не буде менша за 0,01 г.

Далі висушений зразок подрібнюють у ступці з товкачиком до повного просіювання через сито з діаметром пор 0,25 мм відбирають по 3 г зразка в нетарований тигль і зважують (m_2). Після цього ставлять в муфельну піч на 2 години при 800°C. Далі спалений зразок охолоджують до кімнатної температури і ставлять в ексикатор на 30 хв, та зважують (m_3). Повторне нагрівання проводять при такій самій температурі протягом 1 год, поки різниця між двома попередніми зважуваннями не буде менша за 0,01 г.

Далі вміст золи (%Золи) та вміст сухих органічних речовин (%СОР) розраховують за формулами:

$$\% \text{Золи} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100$$

та

$$\%COP = \left(1 - \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1}\right) * 100$$

7.1.4 Визначення концентрації біомаси

Для визначення концентрації біомаси в культуральній рідині та після збирання біомаси використовують гравіметричний метод (Mahesh, Naira, & Maiti, 2019).

Принцип методу: Біомасу зі зразка відділяють за допомогою центрифугування, далі її промивають та ставлять на сушіння.

Концентрацію біомаси визначають порівнянням маси до висушування та після висушування.

Матеріали та обладнання:

- Аналітичні ваги з точністю до 3-го знака;
- Сушильна шафа;
- Центрифужні пробірки;
- Центрифуга;
- Ексикатор.

Хід виконання: Спершу в сушильній шафі при 105 °С висушують центрифужні пробірки до постійної маси, далі їх зважують (m_1). Після цього відібраний зразок 25 мл центрифугують при 4000 об/хв протягом 10 хв. Далі зливають супернатант та доливають дистильовану воду до 25 мл і знову центрифугують при тих самих умовах.

Після центрифугування зливають супернатант і ставлять пробірки у сушильну шафу на висушування при 105°С до постійної маси. Після висушування пробірки охолоджують в ексикаторі до кімнатної температури та знову зважують (m_2). Далі концентрацію біомаси ($C_{\text{біомаси}}$) визначають за формулою:

$$C_{\text{біомаси}}(\text{г/л}) = \frac{m_2 - m_1 * 1000}{V}$$

де m_1 – маса висушеної пробірки, [г]; m_2 – маса висушеного пробірки та біомаси, [г]; V – об'єм зразка, [мл];

7.1.5 Визначення вмісту хлорофілу

Визначення вмісту хлорофілу проводять спектрофотометрично (Zhao, Duan, Zhang, & Tan, 2018).

Принцип методу: Хлорофіл, який міститься у зразку, тричі екстрагують за допомогою етанолу в темряві. Далі отриманий етанольний екстракт центрифугують та вимірюють оптичну густину надосадової рідини за допомогою спектрофотометра при 652 нм.

Матеріали та обладнання:

- Етанол;
- Пробірки;
- PTFE-вкладка;
- Центрифугу;
- Спектрофотометр;
- Самплер;
- Колба 50 мл;
- Кювета.

Хід виконання: Спершу 1 г зразка переносять у пробірку, далі додають до неї 15 мл етанолу, закривають PTFE-вкладкою та загвинчують кришку. Ретельно струшують і залишають на 4 години у темряві. Далі центрифугують при 8000 об/хв протягом 10 хв. Супернатант зливають у 50 мл колбу, а залишок знову заливають етанолом і екстрагують протягом 4 годин у темряві.

Цей процес повторюють тричі, а далі колбу з екстрагованим хлорофілом струшують і за допомогою самплера відбирають 4 мл зразка, який переносять до кювети. Потім вимірюють оптичну густину при 652 нм за допомогою спектрофотометра. Вміст хлорофілу розраховують за формулою:

$$C_{\text{хлорофілу}} \text{ (мг/г)} = \frac{OD * V * N * W}{34,5}$$

де OD – оптична густина; V – кінцевий об'єм етанолу, [мл]; N – коефіцієнт розведення; W – вага зразка, [г].

7.1.6 Визначення вмісту білку

Для визначення загальної кількості білку в біомасі, залишках біомаси та напівпродуктах використовують метод Бредфорда (Zhao, Duan, Zhang, & Tan, 2018).

Принцип методу: До зразка додають барвник кумассі діамантово синій G250, який у кислому середовищі зв'язується з білками і змінює своє забарвлення з червоно-коричневого на синій, при цьому утворюються характерні комплекси. Їх кількість визначаються спектрофотометрично, вони мають характерний пік поглинання на 595 нм.

Матеріали та обладнання:

- Спектрофотометр
- Кумассі діамантовий синій G250
- Етанол
- НЗРО₄
- Пробірки

Хід виконання: Спершу готують розчин Бредфорда для цього змішують 100 мг барвника кумассі діамантового синього G250, 50 мл етанолу, 100 мл НЗРО₄ та доводять дистильованою водою до 1000 мл.

Якщо досліджують вміст білка в біомасі, то проводять попередню підготовку зразка (Watkins та інші, 2025). Для цього зразок змішують з розчином 0,5 М NaOH, піддають ультразвуковій обробці при 40 кГц протягом 10 хв та додатково нагрівають до 80°C протягом 10 хв. Потім центрифугують протягом 15 хв при 3500 об/хв для видалення залишків біомаси.

Далі до 1 мл досліджуваного зразку додають 5 мл розчину Бредфорда та

ретельно струшують. Дають настоятись 5 хв і після цього вимірюють оптичну густину при довжині хвилі 595 нм на спектрофотометрі. Отримане значення порівнюють з калібрувальною кривою, яка будується з використанням бичачого сироваткового альбуміну в якості стандарту в діапазоні від 0 – 1 мг/л (Chia та інші, 2019).

7.1.7 Визначення вмісту ліпідів

Визначення вмісту ліпідів у біомасі та залишках біомаси проводять за допомогою метода Сокслета (Li, Li, Zhang, & Tan, 2015).

Принцип методу: З сухого зразка за допомогою суміші метанол/хлороформ екстрагують ліпіди, потім випарюють розчинники та зважують, визначаючи їх кількість.

Матеріали та обладнання:

- Лабораторні ваги з точністю до 2-го знака;
- Сушильна шафа;
- Екстрактор Сокслета;
- Метанол;
- Хлороформ;
- Лабораторний вакуумний випарник;
- Колба на 250 мл;
- Ступка з товкачиком;
- Колбонагрівач.

Хід виконання: Спершу висушують колбу на 250 мл до постійної маси в сугильній шафі при 105°C та зважують (m_1). Далі відібраний зразок висушують до постійної маси при температурі 60°C. Далі його ретельно подрібнюють у ступці та відбирають 0,1 г зразку на фільтрувальний папір (m_2), після цього наважку переносять у екстрактор Сокслета. Екстракцію проводять з використанням 100 мл суміші розчинників метанол/хлороформ у об'ємному співвідношенні 2:1 за температури 83°C протягом 12 годин. Потім видаляють розчинники за допомогою

вакуумного випарника. Після цього колбу з ліпідами зважують (m_3) та розраховують вміст ліпідів ($C_{\text{ліпідів}}$) за формулою:

$$C_{\text{ліпідів}} \text{ (мг/г)} = \frac{m_3 - m_1}{m_2} * 1000$$

де m_1 – маса висушеної колби, [г]; m_2 – маса взятої наважки для екстракції, [г]; m_3 – маса отриманих ліпідів з колбою, [г].

7.1.8 Визначення вмісту полісахаридів

Для визначення загальної кількості полісахаридів у біомасі, напівпродуктах та цільовому продукті використовують модифікований метод фенол-сірчаної кислоти (Li, Jiang, Li, Zhang, & Tan, 2013).

Принцип методу: Метод полягає у розкладні полісахаридів до моносахаридів та перетворення їх на фурфуроли за допомогою концентрованої сірчаної кислоти. Вони взаємодіють з фенолом утворюючи характерний помаранчево-жовтий комплекс, інтенсивність кольору якого прямо пропорційна кількості утворених комплексів.

Матеріали та обладнання:

- Концентрована сульфатна кислота;
- 6% розчин фенолу;
- Водяна баня;
- Пробірки;
- Кювета;
- Спектрофотометр.

Хід виконання: У пробірку відбирають зразок об'ємом 1 мл, далі додають 0,5 мл 6% розчину фенолу та покраплинно 3 мл концентрованої сульфатної кислоти. Після цього витримують пробірку на водяній бані при температурі 30 °C протягом 30 хв. Далі переносять суміш у кювету та вимірюють оптичну густину на спектрофотометрі при довжині хвилі 490 нм. Отриманий результат переводять у г/л за регресійним рівнянням $y = 5,45 x$ ($R^2 = 0,9998$ $P < 0,05$).

7.3 Підбір методів контролю показників якості біодизелю

7.3.1 Визначення температури спалаху

Визначення температури спалаху прописане у ДСТУ EN ISO 3679:2024 Визначення температури спалаху. Метод випробування здатності до спалаху в закритому тиглі малого розміру (EN ISO 3679:2022, IDT; ISO 3679:2022, IDT).

Принцип методу: полягає у нагріванні зразка при безперервному перемішуванні у малому закритому тиглі до появи випарів, які визначають підносячи пальник, поява полум'я над зразком сигналізує про температуру спалаху.

Матеріали та обладнання:

- Тигиль з кришкою;
- Автоматичний аналізатор температури спалаху за методом Пенскі-Мартенса.

Хід виконання: У тигель з кришкою наливають об'єм зразку. Далі ставлять тигель в автоматичний аналізатор температури спалаху, вмикають перемішування та починають рівномірний нагрів. Через однакові проміжки часу вимикають перемішування і підносять пальник до отвору в кришці тиглю, операцію повторюють поки не відбудеться спалах випарів. Ця температура буде вважатись температурою спалаху в закритому тиглі за атмосферного тиску, але вона потребує коригування:

$$T_c (\text{°C}) = T_d + 0,25 (101,3 - p)$$

де T_d – отримане значення температури спалаху при атмосферному тиску, [°C];
 p – значення атмосферного тиску, [кПа].

Для біодизелю це значення повинно становити мінімум 130°C.

7.3.2 Визначення цетанового числа

З метою визначення цетанового числа слід звернутись до ДСТУ EN ISO 5165:2022 Нафтопродукти. Визначення якості запалювання дизельного палива. Метод цетанового двигуна (EN ISO 5165:2020, IDT; ISO 5165:2020, IDT).

Принцип методу: полягає у порівнянні характеристик займання біодизелю з двома еталонами з вищим та нижчим цетановим числом у одноциліндровому CFR-двигуні.

Матеріали та обладнання:

- Еталони з вищим та нижчим цетановим числом;
- Установа CFR для визначення цетанового числа;

Хід виконання: В установку CFR-двигуна для визначення цетанового числа при стандартних умовах подають зразок, далі регулюють ступінь стиснення за допомогою маховика мікрометра, поки індикатор не покаже, що досягнуто стандартного кута затримки займання 13°. Фіксують отримане значення мікрометраю і повторюють ті самі дії для еталонів. Після цього цетанове число розраховують за формулою:

$$\text{ЦЧ} = \text{ЦЧ}_\text{м} + \left(\frac{R_\text{м} - R_\text{зр}}{R_\text{м} - R_\text{б}} \right) * (\text{ЦЧ}_\text{б} - \text{ЦЧ}_\text{м})$$

де ЦЧ_м – цетанове число еталону з нижчим цетановим числом; R_м, R_{зр}, R_б – показник маховика мікрометра для еталону з нижчим цетановим числом, зразка, еталону з вищим цетановим числом; ЦЧ_б – цетанове число еталону з вищим цетановим числом.

Для біодизелю цетанове число повинно бути не менше 51.

7.3.3 Визначення густини

Вимірювання густини біодизеля проводять відповідно до ДСТУ EN ISO 3675:2012 Нафта сира та нафтопродукти рідкі. Метод лабораторного визначення густини ареометром (EN ISO 3675:1998, IDT).

Принцип методу: пряме вимірювання густини за допомогою ареометра при постійній температурі та приведення отриманого значення до температури 15 °C за стандартними таблицями.

Матеріали та обладнання:

- Мірний цилінр на 500 мл;

- Аерометр з термометром;
- Водяна баня з автоматичною підтримкою температури.

Хід виконання: У мірний циліндр наливають 300 мл біодизелю, далі цей циліндр ставлять на водяну баню з автоматичною підтримкою температури, яка налаштована на 20 °С. Після чекають поки зі зразка вийдуть всі бульбашки повітря і опускають в нього чистий та сухий аерометр. Чекають 20 хв поки температура та показники аерометра стабілізуються.

Далі визначають за верхнім меніском значення та занотовують його. Після цього повторюють дослід повторно і якщо розходження не більше 0,001, середнє значення приймають як основне. Далі за допомогою стандартних таблиць приводять отримане значення густини до 15 °С. Для біодизелю це значення повинно бути в межах 860 - 900 кг/м³.

7.3.4 Визначення кінематична в'язкості

Для визначення кінематичної в'язкості біодизелю застосовують метод прописаний у ДСТУ EN ISO 3104:2022 Нафтопродукти. Прозорі та непрозорі рідини. Визначення кінематичної в'язкості та обчислення динамічної в'язкості (EN ISO 3104:2020, IDT; ISO 3104:2020, IDT).

Принцип методу: полягає у вимірюванні часу, який необхідний для проходження певного об'єму зразка під дією сили тяжіння через калібрований віскозиметр при постійній температурі.

Матеріали та обладнання:

- Термометр;
- Віскозиметр;
- Термостат;
- Хімічний стакан;
- Секундомір.

Хід виконання: У віскозиметр заливають необхідний об'єм зразка, далі

ставлять його у термостат на 15 хв при 40 °С. Далі фіксують значення температури за допомогою термометра. Далі відкривають кран і чекають поки зразок досягне мітки «а» від цього починаю відлік часу, поки зразок не пройде мітку «б». Дослідження проводять декілька разів, щоб розбіжність між ними не повинна відрізнятись від середньогоарифметичного більше ніж +- 0,5 %. Кінематичну в'язкість ν далі розраховують за формулою:

$$\nu \text{ (мм}^2\text{/с)} = C/t,$$

де C – константа віскозиметра, [мм²/с²]; t – час проходження зразка між мітками, [с].

Для біодизелю це значення при 40 °С повинно бути в межах 3,5-5,0 мм²/с.

7.3.5 Визначення йодного числа

Визначення йодного числа відбувається за ДСТУ EN 14111:2009 Похідні жирів та олій. Метиллові ефіри жирних кислот (МЕЖК). Метод визначення йодного числа (EN 14111:2003, IDT).

Принцип методу: полягає у вимірюванні за допомогою титрування з тіосульфатом натрію кількості реагенту Вайса, яка приєднується до подвійних зв'язків у молекулах зразка.

Матеріали та обладнання:

- Реактив Вайса;
- Змішаний розчинник;
- Титрувальна бюретка;
- Хімічний стакан;
- Калій йодид;
- Натрій тіосульфат.

Хід виконання: До зразка додають змішаний розчинник, потім додають реактив Вайса. Після дають настоятись протягом 30 хв, а далі додають калій йодид та воду, що призводить до вивільнення йоду. Далі проводять титрування стандартним розчином натрій тіосульфату. Отриманий результат записують і

додатково проводять аналіз з холостою пробою. Йодне число визначають за формулою:

$$\text{ЙЧ (г I}_2\text{/ 100 г)} = \frac{12,69 * C * (V1 - V2) * M(I) * 100}{m}$$

де C – молярна концентрація натрій тіосульфату, [моль/л]; $V2$ – об'єм титранту витраченого на титрування зразка, [мл]; $V1$ – об'єм титранту витраченого на титрування холостої проби, [мл]; $M(I)$ – молярна маса йоду, [г/моль]; m – маса взятого зразка, [г].

Для біодизелю це значення повинно бути не більше 120 г I_2 / 100 г

7.3.6 Визначення кислотного числа

Кислотне число визначається за ДСТУ EN 14104:2009 Похідні жирів та олій. Метиліві ефіри жирних кислот (МЕЖК). Метод визначення кислотного числа (EN 14104:2003, IDT).

Принцип методу: полягає у титруванні зразка з калій гідроксидом до еквівалентної точки.

Матеріали та обладнання:

- Етанол;
- Діетиловий ефір;
- Калій гідроксид;
- Фенолфталеїн;
- Титрувальна бюретка;
- Хімічний стакан.

Хід виконання: Зразок змішують з етанолом та діетиловим ефіром, потім додають декілька капель фенолфталеїну. Проводять титрування з використанням калій гідроксиду до появи стійкого рожевого забарвлення. Кислотне число КЧ далі розраховують за формулою:

$$\text{КЧ (мг KOH/ 1 г)} = \frac{M(\text{KOH}) * C * V}{m}$$

де C – молярна концентрація Калій гідроксиду, [моль/л]; V – об'єм титранту витраченого на титрування зразка, [мл]; $M(\text{KOH})$ – молярна маса калій гідкросиду, [г/моль]; m – маса взятого зразка, [г].

Для біодизелю це значення повинно бути не більше 0,5 мг KOH/ 1 г

7.3.7 Визначення окисної стабільності

Визначення окисної стабільності проводять за ДСТУ EN 14112:2009 Похідні жирів та олій. Метиллові ефіри жирних кислот (МЕЖК). Метод визначення стійкості до окиснювання (прискорений метод) (EN 14112:2003, IDT).

Принцип методу: полягає у прискореному окисненні зразка за рахунок постійного продування гарячого повітря через зразок та вимірювання збільшення електропровідності дистильованої води через яку пропускають це повітря.

Матеріали та обладнання:

- Хімічний посуд;
- Дистильована вода;
- Годинник;
- Кондуктометр.

Хід виконання: Зважену наважку зразку поміщають у реакційну посудину, яку нагрівають до 110 °С. Далі через неї постійним потоком пропускають повітря, яке відводять в іншу посудину з дистильованою водою, де вимірюють електропровідність. Заміряють час від початку продування, до раптового збільшення електропровідності. Для біодизелю цей час повинно становити не менше 3 годин

7.3.8 Визначення коксового залишку

Визначення коксового залишку відбувається за ДСТУ EN ISO 10370:2012 Нафтопродукти. Визначення коксового залишку мікрометодом (EN ISO 10370:1996, IDT).

Принцип методу: полягає у піролізі певного об'єму біодизелю та зважуванні

маси коксу, яка утворилася при цьому.

Матеріали та обладнання:

- Тигель з кришечкою;
- Азот;
- Електрична піч.

Хід виконання: Зразок зважують та переносять у попередньо висушений до постійної маси та зважений тигель з кришечкою. Далі його піддають піролізу при 550 °С без доступу кисню. Потім тигель охолоджують в ексікаторі та зважують. Результат розраховують за формулою:

$$КЗ (\%) = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100$$

де m_1 – маса порожнього висушеного тигля з кришечкою, [г]; m_2 – маса висушеного тигля з кришечкою та зразком, [г]; m_3 – маса висушеного тигля з кришечкою та зразком після піролізу, [г].

Для біодизелю це значення повинно бути не більше 0,3%

7.3.9 Визначення корозії мідної пластини

Визначення корозії мідної пластини відбувається за ДСТУ EN ISO 2160:2012 Нафтопродукти. Метод визначення корозійної дії на мідну пластинку (EN ISO 2160:1998, IDT).

Принцип методу: полягає у витримці відполірованої мідно пластини у зразку протягом певного часу і порівнянням його з стандартами корозії.

Матеріали та обладнання:

- Відполірована мідна пластинка;
- Термостат;
- Стандартні зразки корозії.

Хід виконання: Відполіровану мідну пластину занурюють у зразок та нагрівають до 50 °С. Далі витримують протягом 3 годин, після цього пластину

промивають і порівнюють зі стандартами корозії. Для біодизел мідна пластина повинна витримувати клас 1.

7.3.10 Визначення масової частки сульфатної золи

Визначення масової частки сульфатної золи проводять ДСТУ ISO 3987:2019 Нафтопродукти. Визначення масової частки сульфатної золи в мастильних оливах і добавках (ISO 3987:2010, IDT)

Принцип методу: полягає у спалюванні зразка, його обробці сульфатною кислотою та прожаруванні його до постійної маси за високої температури.

Матеріали та обладнання:

- Тигель;
- Лабораторні ваги;
- Муфельна піч.

Хід виконання: Певний об'єм зразка зважують та поміщають у тигель, далі його спалюють у муфельній печі без розбризкування. Після цього до отриманої золи додають декілька крапель сульфатної кислоти, та знову ставлять у муфельну піч, але вже при великих температурах 775 °С до постійної маси. Після спалювання зразок охолоджують та зважують. Результати розраховують за формулою:

$$\text{Вміст золи (\%)} = \frac{m_2}{m_1} * 100$$

де m_1 – маса зразка до спалювання, [г]; m_2 – маса отриманої золи, [г].

Для біодизелю це значення повинно бути максимум 0,02 % від маси

7.3.11 Визначення вмісту води

Визначення вмісту води проводять за ДСТУ ISO 12937:2012 Нафтопродукти. Визначення води методом кулонометричного титрування за Карлом Фішером (ISO 12937:2000, IDT).

Принцип методу: полягає в кількісній взаємодії йоду в діоксиді сірки із водою в присутності піридину. Кількість йоду, який вступив у реакцію, визначають прямим титруванням реактивом Фішера і розраховують масову частку вологи.

Матеріали та обладнання:

- Титрувальна комірка;
- Кулонометричний титратор волога за Карлом Фішером;
- Реактив Карла Фішера.

Хід виконання: Точно зважений нафтопродукту вводять у герметичну комірку для титрування, яка містить робочий реагент. Далі, електричний струм подається на генераторний електрод, електрохімічно генеруючи йод з йодиду. Згенерований йод кількісно реагує з водою, присутньою у зразку, відповідно до реакції Карла Фішера. Процес генерації йоду триває доти, доки потенціометричний електрод не зафіксує надлишок йоду, що сигналізує про завершення реакції. Загальна кількість електрики, витрачена на генерацію йоду, перетворюється на масу води та розраховується за формулою:

$$w \text{ води (мг H}_2\text{O/кг)} = \frac{Q * 1000}{m * Fk}$$

де Q – кількість електричного струму затрачена на генерацію йоду, [Кл]; Fk – кулонометричний коефіцієнт [Кл/ мг води]; m – маса використаного зразку, [г].

Для біодизелю це значення повинно бути не більше 500 мг води/кг.

7.3.12 Визначення масової частки моно- ди- тригліцеридів, вільного гліцерину та загального гліцерину

Визначення масової частки моно- ди- тригліцеридів, вільного гліцерину та загального гліцерину проводять за ДСТУ EN 14105:2009 Похідні жирів та олій. Метиллові ефіри жирних кислот (МЕЖК). Метод визначення вмісту вільного та загального гліцерину та моно-, ди- та тригліцеридів (контрольний метод) (EN 14105:2003, IDT)

Принцип методу: полягає у силілюванні всіх полярних компонентів зразка, що містять гідроксильні групи таких як гліцерин, моно- , ди- та тригліцериди, для підвищення їхньої розділення. Після цього дериватизований зразок вводиться в газовий хроматограф для розділення та кількісного вимірювання за допомогою полум'яно-іонізаційного детектору.

Матеріали та обладнання:

- Газовий хроматограф з ПД;
- Капілярна ГХ-колонка;
- Мікрошприци (10–100 мкл);
- Внутрішні стандарти;
- Аналітичні ваги;
- Реагент BSTFA;
- Гексан.

Хід виконання: Зразок відбирають і зважують, додають два внутрішні стандарти — 1,2,4-бутантріол для визначення вільного гліцерину та 1,2,3-трикапроілгліцерин (трикаприн) для визначення моно-, ди- і тригліцеридів, після чого розчиняють у гексані та проводять силілювання реагентом BSTFA при 60 °С до повного утворення похідних; готову суміш вводять у газовий хроматограф з ПД, реєструють піки компонентів і внутрішніх стандартів, інтегрують площі піків та визначають вміст вільного гліцерину, моно-, ди- і тригліцеридів за калібрувальними коефіцієнтами і співвідношенням площ піків з внутрішнім стандартом, а загальний вміст гліцерину розраховують через суму вільного гліцерину та внесок гліцерину з моногліцеридів, дигліцеридів і тригліцеридів за стехіометричними коефіцієнтами.

$$G_t = G + 0,255M + 0,146D + 0,103T,$$

де G_t - масова частка загального гліцерину (вільного та зв'язаного) у зразку, % мас.;

G - масова частка вільного гліцерину у зразку. % мас.;

M - масова частка моногліцеридів у зразку. % мас.;

D - масова частка дигліцеридів у зразку. % мас.;

T - масова частка тригліцеридів у зразку. % мас.

Для біодизелю це значення повинно бути не більше для моногліцеридів 0,8% за масою, для дигліцеридів не більше 0,2% за масою, для тригліцеридів не більше за масою 0,2%, для вільних гліцеридів не більше 0,02% за масою, для загального гліцерину не більше за масою 0,25%.

7.3.13 Визначення масової частки фосфору

Визначення масової частки фосфору проводять за ДСТУ EN 14107:2009 Похідні жирів та олій. Метиллові ефіри жирних кислот (МЕЖК). Метод визначення вмісту фосфору емісійною спектрометрією з індуктивно наведеною плазмою (EN 14107:2003, IDT).

Принцип методу: у руйнуванні молекул зразка в надзвичайно гарячій плазмі, збудженні атомів фосфору та вимірюванні інтенсивності світла, яке ці атоми випромінюють при поверненні до основного стану.

Матеріали та обладнання:

- Лабораторні ваги;
- ІСП-емісійний спектрометр;
- Ксилол;
- Калібрувальні стандарти.

Хід виконання: Для виконання аналізу спочатку готують калібрувальну криву, розводячи сертифікований стандарт фосфору високочистим ксилолом. Далі, точно зважений зразок також розчиняють до певного об'єму у ксилолі, щоб отримана концентрація фосфору потрапляла в діапазон калібрування. Підготовлений розчин зразка подають до ІСП-емісійний спектрометр, де атоми фосфору збуджуються і випромінюють світло на характерній довжині хвилі 213,6 і 178,3 нм. Спектрометр вимірює інтенсивність цього випромінювання, визначаючи концентрацію фосфору у розведеному розчині. Масову частку розраховують за формулою:

$$C (P)(\%) = \frac{CP * V_{роз}}{m_{зр} * 1000} * 100$$

де CP – визначена концентрація фосфору, [мг/л]; V_{роз} – маса зразка [мл]; m_{зр} – маса зразка [г].

Для біодизелю це значення повинно бути не більше 0,01% за масою.

7.3.14 Визначення загального забруднення

Визначення загального забруднення проводять за ДСТУ EN 12662:2022 Рідкі нафтопродукти. Визначення загального забруднення середніх дистилатів, дизельного палива та метилових ефірів жирних кислот (EN 12662:2014, IDT).

Принцип методу: полягає у фільтруванні зразка через мембранний фільтр, подальшому промиванні осаду розчинником та висушуванні до постійної маси.

Матеріали та обладнання:

- Лабораторні ваги;
- Сушильна шафа;
- n-Гексан;
- мембранний фільтр з діаметром пор 0,8 мкм.

Хід виконання: Зразок зважують і фільтрують через попередньо висушений до постійної маси та зважений мембранний фільтр з діаметром пор 0,8 мкм. Далі отриманий осад додатково промивають n-гексаном і ставлять фільтр на висушування до постійної маси у сушильну шафу. Далі охолоджують його в ексікаторі та зважують. Аналіз результатів проводять за формулою:

$$m \text{ забруднення (мг /кг)} = \frac{m_2 - m_1}{m_3}$$

де m_3 – маса взятого зразку для аналізу, [кг]; m_2 – маса висушеного фільтра з осадом [мг]; m_1 – маса висушеного фільтра, [мг].

Для біодизелю це значення повинно бути не більше 24 мг/кг.

7.4 Підбір методів контролю показників якості концентрату білків

7.4.1 Визначення загального білку

Визначення загального білку проводять за допомогою модифікованого методу К'ельдаля за ДСТУ 7911:2015.

Принцип методу: ґрунтується на мінералізації наважки добрива кип'ятінням з концентрованою сульфатною кислотою за наявності змішаного каталізатора. У подальшому проводять дистиляцію аміаку в розчин борної кислоти з подальшим

титруванням.

Матеріали та обладнання:

- Ваги лабораторні;
- Колба К'ельдаля;
- Дистиляційна установка;
- Концентрована сульфатна кислота;
- Індикатор Гроака;
- Мірний циліндр;
- Піпетки градуйовані;
- Кислота борна;
- Натрій гідроксид;
- Реактив Неслера;
- Магній оксид.

Хід виконання: Спершу відбирають наважку 1 г продукту, далі поміщають цю наважку в колбу К'ельдаля далі додають туди 10 мл концентрованої сульфатної кислоти і залишають на 20 годин. Далі Накривають колбу пробкою холодильником і доводять кислоту до слабкого кипіння. Коли рідина в колбі стане бурити нагрівання припиняють, додають 0,5 г змішаного каталізатора і продовжують нагрівати до знебарвлення рідини в колбі. Далі промивають пробку холодильник збираючи воду і переливають вміст до мірної колби на 250 мл. Доводять дистильованою позначкою до мітки. Далі в дистиляційну установку додають 25 мл розчину борної кислоти, додають 6 крапель індикатора Гроака і перемішують. Піпеткою переносять до установки 25 мл мінералізату, додають циліндром 300 мл дистильованої води і додають розчин натрій гідроксиду. Далі починають дистиляцію, до моменту знебарвлення з реактивом Неслера. Отриманий вміст титрують за допомогою 0,1 М розчину сульфатної кислоти до переходу забарвлення індикатору від яскраво-зеленого до фіолетового кольору. Загальну кількість нітрогену розраховують за формулою:

$$wN = \frac{V1 * c1 * M * V2 * 100}{m * V3 * 1000}$$

де V1 – об'єм розчину сірчаної кислоти, [мл]; c1 – молярна концентрація розчину сірчаної кислоти [моль/л]; M – молярна маса нітрогену, [г/моль]; m – маса наважки добрива, [г]; V2 – об'єм розчину мінералізату, [мл]; V3 – об'єм розчину мінералізату взятого для дистиляції, [мл].

Вміст загального білку у продуктів визначають у перерахунку з кількості нітрогену в зразку за формулою:

$$P = N * F$$

Де P – кількість у відсотках білку в біомасі; N - кількість нітрогену в білку; F – коефіцієнт для переводу, для біомаси водоростей становить 5,5

7.4.2 Визначення амінокислотного складу

Для визначення амінокислотного складу застосовують метод ВЕРХ розроблений (Araуа та ін., 2021)

Принцип методу: Білок повністю гідролізують 6 М НСІ під тиском для отримання вільних амінокислот. Амінокислоти дериватизують ОРА-реагентом, після чого розділяють і кількісно визначають методом ВЕРХ із діод-матричним детектором.

Матеріали та обладнання:

- Система HPLC з діод-матричним детектором;
- Хроматографічна колонка ZORBAX Eclipse AAA (150 × 4,6 мм, 3,5 мкм);
- Дистильована вода;
- Ацетонітрил (HPLC-grade);
- Борнатний буфер рН 10,2;
- Реагент ОРА (о-фталевий альдегід + 3-меркаптопропіонова кислота);
- 6 М НСІ;

- Стандартний набір амінокислот (AAS-20);
- Фільтри 0,22 мкм;
- Автоклав (120 °С) ;
- аналітичні ваги;
- мірні колби.

Хід виконання: Зважують 200 мг сухого білкового концентрату. Додають 10 мл 6 М HCl у герметичну гідролізну трубку. Гідроліз проводять при 120 °С протягом 2 год у автоклаві. Після охолодження фільтрують та доводять об'єм до 50 мл дистильованою водою. Беруть 100 мкл гідролізату, нейтралізують борнатним буфером до рН ~10,2, висушують, розчиняють у 200 мкл борнатного буферу та фільтрують через 0,22 мкм. До 10 мкл проби додають 10 мкл свіжоприготовленого ОРА-реагенту, перемішують та одразу інжектують у ВЕРХ.

Умови хроматографії:

Колонка ZORBAX Eclipse AAA, $t = 40$ °С, швидкість потоку 1,0 мл/хв.

А – борнатний буфер;

В – ацетонітрил/метанол/вода (45:45:10).

Гradient згідно стандартного протоколу для колонок AAA (початкова частка В ~10%, до 60% В за 25 хв). Детекція при 338 нм. Час утримання становить: Аспарагінова кислота 1.5 - Глутамінова кислота 3.0 - Аспарагін 5.5 - Серин 6.0 - Глутамін 6.5 - Гліцин 6.7 - Треонін 7.0 - Аланін 7.7 - Гістидин 7.7 - Аргінін 8.5 - Тирозин 10.0 - Метіонін 11.2 - Валін 11.8 - Цистеїн 12.0 - Триптофан 13.0 - Фенілаланін 13.5 - Лейцин 14.0 - Ізолейцин 14.8 - Лізин 16.0 хв

Вміст амінокислот встановлюють за калібрувальними кривими, побудованими за стандартним набором амінокислот AAS-18. Розрахунок здійснюють за піковими площами дериватів ОРА.

7.4.3 Визначення вологості

Для визначення вмісту сухих речовин та вологи використовують аналогічний до підпункту 7.1.2 термогравіметричний метод (ДСТУ ISO 6496:2005, ДП «УкрНДНЦ»).

7.5 Підбір методів контролю показників якості феофорбід

7.5.1 Визначення вмісту феофорбід

Для визначення вмісту феофорбід використовують метод високоефективної рідиної хроматографії в поєднанні з мас-спектрометрією з високою роздільною здатністю (Šinčárová та інші, 2021).

Принцип методу: Зразок розділяють за допомогою ВЕРХ для виділення феофорбід, а далі кількісно вимірюють за допомогою мас-спектрометрії.

Матеріали та обладнання:

- Система Dionex UltiMate 3000 UHPLC+ (Thermo Scientific, Саннівейл) обладнання діод матричним детектором;
- Хроматографічна колонка з оберненою фазою C18 (Phenomenex Kinetex, 150 × 4,6 мм, 2,6 мкм, 100А);
- Мас-спектрометр високої роздільної здатності HD (Bruker) з електроспрей-іонізацією;
- Дистильована вода;
- Метанол;
- Мурашина кислота;
- Кластери форміату натрію;
- Аналітичний стандарт феофорбід а (Cayman chemicals, no. 160 72).

Хід виконання: Розділення сполук проводять на колонці з оберненою фазою C18 (Phenomenex Kinetex, 150 × 4,6 мм, 2,6 мкм, 100А) з використанням системи Dionex UltiMate 3000 UHPLC+ (Thermo Scientific, Саннівейл), яка обладнання діод матричним детектором. Для хроматографії використовують градієнту рухому фазу, яка складалась з двох компонентів: А – Дистильована вода та Б – метанолу. До обох компонентів додають по 0,1% мурашиної кислоти. Колонка елюювалась наступним градієнтом при постійній швидкості потоку 0,6 мл/хв: А/Б 10/90 (1 хв), 0/100 (20 хв), 0/100 (30 хв), 10/90 (35 хв).

До системи ВЕРХ приєднують мас-спектрометр високої роздільної здатності, яка працює у режимі електроспрей-іонізації. Іонізацію проводили з наступними

налаштуваннями: температура сушіння 250 °С, витрата сушильного газу 12 л/хв, тиск газу в небулайзері 5 бар, напруга капіляра 4 кВт, напруга кінцевої пластини 500 В, діапазон збору даних m/z від 20 до 2500 з спектральною частотою 3 Гц. Калібрування мас-спектрометра проводять за кластерами формиату натрію.

Визначення феофорбід а здійснюють при часу утримання 10,8 хв за масо-зарядним співвідношенням m/z 593,28. Кількість феофорбід а розраховують за калібрувальною кривою, яку отримують використовуючи аналітичний стандарт феофорбід а.

7.5.2 Визначення вмісту вологи

Для визначення вмісту вологи використовують модифікований термогравіметричний метод (ДСТУ ISO 6496:2005, ДП «УкрНДНЦ»).

Принцип методу: цей метод базується на визначенні різниці мас досліджуваного зразка до висушування та після висушування до постійної маси.

Матеріали та обладнання:

- Аналітичні ваги з точністю до 3-го знака;
- Вакуумсушильна шафа;
- Порцелянові тиглі;
- Щипці для тиглів;
- Ексикатор.

Хід виконання: Спершу в вакуум сушильній шафі при 105 °С висушують тигль до постійної маси, далі його зважують (m_1). Після цього у зважений тигль, не таруючу ваги, відбирають 1 г зразка (m_2) та ставлять на висушування при 30°С до постійної маси. Після висушування тигль зі зразком знову зважують (m_3). Далі вміст вологи (%W) визначають за формулою:

$$\%W = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} * 100$$

де m_1 – маса висушеного тигля, [г]; m_2 – маса висушеного тигля та вологого зразка, [г]; m_3 – маса висушеного тигля та висушеного зразка, [г];

РОЗДІЛ 8. ПРОЄКТ ЗАЯВКИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

Корисна модель, яка відноситься до сфери біотехнології, стосується комплексного виробництва багатьох корисних продуктів з водоростей вирощених з використанням CO₂ від процесу покращення біогазу до біометану, а саме: біометану та біодизелю, які можуть використовуватись для транспорту, феофорбиду, який може бути використаний в медицині, а також білку, який можна використати в харчовій промисловості.

Відомий спосіб переробки синьо-зелених водоростей на біогаз, ліпіди для виробництва біодизелю та органічного добрива (Пат. 105896 UA, МПК C12P 5/00. Спосіб отримання біогазу із синьо-зелених водоростей / Мальований М.С., Никифоров В.В., Харламова О.В., Синельников О.Д.; Опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7/2016.).

Недоліками цієї корисної моделі є обмеженість сировини через її нестабільність складу та сезонність, яка прив'язана до періоду цвітіння води у водоймах, неефективний метод збирання біомаси кавітацією, який збільшує вихід ліпід всього до 1,01 % від сухої маси водоростей, а також малий перелік продуктів, які можна виробити, а саме: біогаз, ліпіди та органічне добриво.

В основу корисної моделі закладено задачу створення нового способу культивування водоростей з використанням CO₂ від процесу покращення біогазу до біометану та їх переробки на декілька продуктів з доданою вартістю.

Поставлена задача вирішується тим, що розроблено спосіб культивування *Scenedesmus abundans* на оптимізованому мінеральному середовищі з викроситанням CO₂ від процесу покращення біогазу до біометану в якості основного джерела вуглецевого живлення, а також розроблено спосіб повноцінної переробки біомаси на декілька продуктів з доданою вартістю без залишення відходів біомаси.

					НУХТ БТЕК 02.01.05 КР ПЗ		
Змн.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Сидоренко М.Р.			РОЗДІЛ 8. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА		
Перевір.		Стабніков В.П.					
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.		Стабніков В.П.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						117	136
					Кафедра БТМ		

Для доведення промислової придатності цього способу наведено опис послідовності виконання технологічних операцій.

1. Стадія культивування водоростей *Scenedesmus abundans*

Культивування *S. abundans* здійснюють у плоскому фотобіореакторів у оптимізованому рідкому середовищі такого складу: 2500 мг/л сечовини, 1000 мг/л K_2HPO_4 , 1500 мг/л $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 1000 мг/л $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ та 0,1% мікроелементів ($CoCl_2 \cdot 2H_2O$ – 0,02 г/л, H_3BO_3 – 5,72 г/л, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ – 3,62 г/л, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,44 г/л, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ – 0,16 г/л, $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ – 0,084 г/л)

Умови культивування були наступними: штучне освітлення 2162 $\mu E/m^2/c$ фотоперіод 14 год:10 год, швидкість потоку повітря 1 об/об/хв з 2% об./об. CO_2 від процесу покращення біогазу до біометану в повітрі з тиском 2 бари.

2. Стадія збирання біомаси

Для збирання біомаси проводять флокуляцію з використанням $Fe(III)Cl_3$ концентрацією 150 мг/л та часом осідання 40 хв, а також фільтрування на стрічковому фільтр-пресі.

3. Стадія попередньої обробки біомаси

Проводять термічну обробку при 90 °С протягом 2,5 годин, потім — ферментативну обробку целюлазою з концентрацією 12 г/л протягом 4 годин.

4. Стадія розділення попередньо обробленої біомаси

Розділення біомаси здійснюють сепарацією на сепараторах при 5000 об/хв.

5. Стадія трифазного розділення супернатанту

Здійснюється з додаванням 40% амоній сульфату та t-бутанолу до супернатанту з співвідношенням 2:1. Після відстоювання t-бутанол буде у верхній фазі, білки будуть плавати у проміжній фазі, а розчинені полісахариди будуть у нижній фазі.

6. Стадія виробництва білково-амінокислотного концентрату

Полягає у збиранні білків з проміжної фази шляхом сепарування на сепараторі при 10 000 об/хв та подальшому випарюванні розчинника на вакуум випарному апараті при $P = 0,04$ МПа; $t = 40$ °С, промиванні білків водою та знову виділенні на

сепараторах при 10 000 об/хв, і кінцевому сушінні на розпилювальній сушарці при $t = 120^{\circ}\text{C}$; $\tau = 3$ хв до вмісту вологи 10 %.

7. Стадія отримання полісахаридів

Проводиться шляхом осадження розчинених полісахаридів з нижньої фази за допомогою етанолу, їх збиранню за допомогою фільтрування на нутч-фільтрі, випарюванні залишків етанолу при $P = 0,04$ МПа; $t = 40^{\circ}\text{C}$.

8. Стадія кислотного гідролізу преципітату

Полягає в обробці біомаси 0,8 М розчином сульфатної кислоти при $t = 60^{\circ}\text{C}$ та подальшому нейтралізуванні кислоти 1 М розчином натрій гідроксиду та збиранням залишків біомаси за допомогою сепарування при 7 000 об/хв.

9. Стадія екстракції

Здійснюють двостадійно з використанням екстрагенту етанол:n-гексан= 1:1 у верхній фазі буде n-гексан з розчиненими ліпідами, у проміжній фазі залишки біомаси, а в нижній фазі розчинений феофорбід в етанолі.

10. Стадія виробництва біодизелю

Спершу випарюють n-гексан на вакуум випарнику при $P = 0,04$ МПа; $t = 40^{\circ}\text{C}$, далі проводять трансестерифікацію за допомогою каталізатору 1,2% натрій гідроксиду, а також метанолу. Після цього проводять відстоювання, далі очищають біодизель промиванням у дистильованій воді з додаванням 1% розчину оцтової кислоти, після цього проводять подальше видалення вологи за допомогою нагрівання до 150°C і витримці протягом 30 хв.

11. Стадія виробництва феофорбиду

Відбувається шляхом випарювання розчинника на вакуум випарному апараті при 0,04 МПа та 40°C , та подальшим сушінням у вакуум сушильній шафі до вологості 10 %.

12. Стадія виробництва біометану

Залишки біомаси після екстаркції випарюють на вакуум випарному апараті, а потім змішують з отриманими полісахаридами та іншими субстратами для процесу анаеробного зброджування у мезофільному режимі при $38 - 40^{\circ}\text{C}$. Отриманий біогаз

за допомогою мембранної фільтрації та адсорбції очищується та покращується до біометану.

Технічним результатом запропонованого способу є забезпечення виробництва біомаси водоростей *Scenedesmus abundans* з використанням CO₂ від стадії покращення біогазу до біометану та комплексної переробки біомаси на біометан, біодизель, білково-амінокислотний концентрат та феофорбід. Послідовність за'явлених операцій дозволяє інтегрувати процес у технологічну схему біометанових заводів та забезпечує підвищення ефективності переробки отриманої біомаси водоростей за рахунок повного використання цієї сировини.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб комплексного виробництва біометану, біодизелю, феофорбиду та білково-амінокислотного концентрату з водоростей *Scenedesmus abundans* вирощених з використанням CO₂ від процесу покращення біогазу до біометану, який відрізняється тим, що культивування *Scenedesmus abundans* здійснюють у плоскому фотобіореакторі в оптимізованому мінеральному середовищі з використанням CO₂ від процесу покращення біогазу до біометану в якості основного джерела вуглецевого живлення, а отриману біомасу піддають комплексній переробці за допомогою флокуляції, фільтрації, термічної та ферментативної обробки, сепарування, трифазного розділення, осадження, кислотного гідролізу, екстрагування випарювання, сушіння.

РЕФЕРАТ

Корисна модель комплексного виробництва біометану, біодизелю, феофорбиду та білково-амінокислотного концентрату з водоростей *Scenedesmus abundans* вирощених з використанням CO₂ від процесу покращення біогазу до біометану належить до сфери біотехнології, що включає культивування водоростей *Scenedesmus abundans* у плоских фотобіореакторах з використанням CO₂ від процесу покращення біогазу до біометану, а також комплексну переробку біомаси водоростей для отримання декілька продуктів з доданою вартістю, а саме біодезеля, біометану, феофорбиду та білково-амінокислотного концентрату.

ВИСНОВКИ

Аналіз наукових джерел за останні 10 років підтверджує зростання зацікавленості до зменшення вуглецевої інтенсивності за рахунок використання водоростей та ціанобактерій. Розвиток біоенергетичного сектору в Україні створює потребу в модернізації вже існуючих виробництв, зокрема через інтеграційні технології.

Запропонована технологія модернізації біометанових заводів дозволяє підвищити рентабельність біометанових виробництв за рахунок розширення спектру продукції, а саме: біодизелю, біометану, феофорбиду та білково-амінокислотного концентрату. Таким чином, вона скорочує термін окупності інвестицій та знижує фінансові ризики пов'язані з залежністю від цін на біоенергетичному ринку. Також ця особливість розкриває високу адаптаційну здатність технології, за рахунок зміни виду та штаму водоростей можна впливати на виходи окремих продуктів залежно від цін та попиту.

Підхід використаний в основі технології дозволяє уникнути втрат матеріальних ресурсів та мінімізує утворення відходів, знижуючи екологічне навантаження на навколишнє середовище. Використані розчинники регенеруються та повторно застосовуються в наступних виробничих циклах, а отриманий сирий гліцерин доводиться до технічної якості та може раціонально застосовуватися у інших сферах.

Проведені розрахунки матеріального балансу, а також попереднього техніко-економічного обґрунтування демонструють, що навіть часткове впровадження цієї технології на біометанових заводах дозволяє зв'язати до 107,8 т CO₂/рік.

Подальший розвиток цієї технології має бути спрямований на оптимізацію матеріально-енергетичних балансів, а також оптимізації процесу культивування водоростей для отримання більшої кількості біомаси.

Реалізації цієї технології в промислових масштабах сприятиме збільшенню рентабельності біометанових виробництв, а також частково — зміцненню біоенергетичного сектору в Україні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Abomohra, A. E. F., Jin, W., Sagar, V., & Ismail, G. A. (2018). Optimization of chemical flocculation of *Scenedesmus obliquus* grown on municipal wastewater for improved biodiesel recovery. *Renewable Energy*, 115, 880–886. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.019>
2. Abomohra, A.E.F., Zheng, X., Wang, Q., Huang, J., & Ebaid, R. (2021). Enhancement of biodiesel yield and characteristics through in-situ solvo-thermal co-transesterification of wet microalgae with spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, 323, 124640. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124640>
3. Adiyaksa, I. P., Ozaltin, K., & Di Martino, A. (2024). Biodiesel production and evaluation using *Chlorella vulgaris* grown in industrial dairy wastewater. *Preprints*, 202403.1061.v1. <https://doi.org/10.20944/preprints202403.1061.v1>
4. Ahn, M. Y., Kwon, S. M., Kim, Y. C., Ahn, S. G., & Yoon, J. H. (2012). Pheophorbide a-mediated photodynamic therapy induces apoptotic cell death in murine oral squamous cell carcinoma in vitro and in vivo. *Oncology Reports*, 27(6), 1772–1778. <https://doi.org/10.3892/or.2012.1748>
5. AironTrade. (2025). Плюси та мінуси полікарбонату. <https://airontrade.ua/pliusy-ta-minusy-polikarbonatu/>
6. Alibaba (2025) Mobile fuel station https://www.alibaba.com/product-detail/Container-Explosion-proof-Barrier-Skid-Mounted_62281994528.html
7. Álvarez, X., Arévalo, O., Salvador, M., Mercado, I., & Velázquez-Martí, B. (2020). Cyanobacterial biomass produced in the wastewater of the dairy industry and its evaluation in anaerobic co-digestion with cattle manure for enhanced methane production. *Processes*, 8(10), 1290. <https://doi.org/10.3390/pr8101290>
8. Ana, F. E., Salgado, E. M., Vilar, V. J. P., Gonçalves, A. L., & Pires, J. C. M. (2024). A growth phase analysis on the influence of light intensity on microalgal stress and potential biofuel production. *Energy Conversion and Management*, 311, 118511. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118511>

9. Ana, F.E., Salgado, E.M., Vilar, V.J.P., Gonçalves, A.L., & Pires, J.C.M. (2024). A growth phase analysis on the influence of light intensity on microalgal stress and potential biofuel production, *Energy Conversion and Management*, *311*, 118511. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118511>.
10. Aramrueang, N., Rapport, J., & Zhang, R. (2016). Effects of hydraulic retention time and organic loading rate on performance and stability of anaerobic digestion of *Spirulina platensis*. *Biosystems Engineering*, *147*, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04>
11. Astals, S., Musenze, R. S., Bai, X., Tannock, S., Tait, S., Pratt, S., & Jensen, P. D. (2015). Anaerobic co-digestion of pig manure and algae: Impact of intracellular algal products recovery on co-digestion performance. *Bioresource Technology*, *181*, 97–104. [10.1016/j.biortech.2015.01.039](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.039)
12. Bacci di Capaci, R., Tasca, A.L., Pannocchia, G., Scali, C., Tognotti, L., Brunazzi, E., Nicoletta C., & Puccini, M. (2019). Biomethane production: Mass and energy balances of alternative supply chains. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *58*(25), 10951-10962. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01149>
13. Barontini, F., Biagini, E., Dragoni, F., Corneli, Ragaglini, G., Bonari, E., Tognotti, L., & Nicoletta, C. (2016). Anaerobic digestion and co-digestion of oleaginous microalgae residues for biogas production. *Chemical Engineering Transactions*, *50*, 91-96. <https://doi.org/10.3303/CET1650016>
14. Baumgart, M., & Lavrijssen, S. (2023). Exploring regulatory strategies for accelerating the development of sustainable hydrogen markets in the European Union. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, *42*(2), 137–166. <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2257528>
15. Cardias, B. B., Barceló-Villalobos, M., Lafarga, T., Ación Fernández, F. G., Morais, M. G., & Costa, J. A. V. (2023). An overall analysis of CO₂ demand and utilization of microalgal cultures in pilot-scale raceway reactors. *Algal Research*, *74*, 103197. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103197>

16. Cheng, Q., Deng, F., Li, H., Qin, Z., Wang, M., & Li, J. (2017). Nutrients removal from the secondary effluents of municipal domestic wastewater by *Oscillatoria tenuis* and subsequent co-digestion with pig manure. *Environmental Technology*, 39(24), 3127–3134. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1375020>
17. Chia, S. R., Chew, K. W., Zaid, H. F. M., Chu, D.–T., Tao, Y., & Show, P. L. (2019). Microalgal protein extraction from *Chlorella vulgaris* FSP-E using triphasic partitioning technique with sonication. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 396. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00396>
18. Chow, Y. Y., Goh, S. J., Su, Z., Ng, D. H., Lim, C. Y., Lim, N. Y., ... Lee, Y. K. (2013). Continual production of glycerol from carbon dioxide by *Dunaliella tertiolecta*. *Bioresour. Technol.*, 136, 550–555. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.040>
19. Činčárová, D., Hájek, J., Dobřichovský, M., Lukeš, M., & Hrouzek, P. (2021). Recommendations on the quantitative analysis of pheophorbides, photosensitizers present in algal biomass intended as food supplement. *Algal Research*, 56, 102298. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102298>
20. Cuellar-Bermudez, S.P., Magdalena, J.A., Muylaert, K., & Gonzalez-Fernandez, C. (2019). High methane yields in anaerobic digestion of the cyanobacterium *Pseudanabaena* sp. *Algal Research*, 44, 101689. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101689>
21. Dantie, M.M., Shin, J., Jang, H.M., Cho, H.U., Wang, J., & Kim, Y.M. (2021). Effects of biological pretreatments of microalgae on hydrolysis, biomethane potential and microbial community. *Bioresource Technology*, 329, 124905. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124905>
22. De Jesus, S.S., Ferreira, G.F., Moreira, L.S., & Filho, R.M. (2020). Biodiesel production from microalgae by direct transesterification using green solvents. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.056>
23. Dębowski, M., Kazimierowicz, J., Świca, I., & Zieliński, M. (2023). Ultrasonic disintegration to improve anaerobic digestion of microalgae with hard cell

walls — *Scenedesmus* sp. and *Pinnularia* sp. *Plants*, 12(1), 53.
<https://doi.org/10.3390/plants12010053>

24. Deže, D., Mihaljević, M., Kovačić, Đ. (2020). Natural communities of microalgae and cyanobacteria from eutrophicated waters as potential co-substrates for small-scale biogas production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 192, 1016–1028.
<https://doi.org/10.1007/s12010-020-03382-y>

25. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council.
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC

26. Eilam, Y., Khattib, H., Pintel, N., & Avni, D. (2023). Microalgae—Sustainable source for alternative proteins and functional ingredients promoting gut and liver health. *Global Challenges*, 7(5), 2200177. <https://doi.org/10.1002/gch2.202200177>

27. European Biogas Association. About biogas and biomethane.
<https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/>

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

29. Ferreira, L. O., Astals, S., & Passos, F. (2021). Anaerobic co-digestion of food waste and microalgae in an integrated treatment plant. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(6), 1545-1554. <https://doi.org/10.1002/jctb.6900>

30. Geletukha, G., Kucheruk, P., & Matveev, Y. (2022). Prospects and Potential for Biomethane Production in Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(4), 67-80. <https://doi.org/10.12912/27197050/149995>

31. Geletukha, H. (2025). State of the art and prospects of biomethane development in Ukraine. Bioenergy Association of Ukraine. <https://uabio.org/news/17950/>

32. <http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/images/chlorophyta/scenedesmus/abundans/abundans9.html>

33. Hu, Y., Kumar, M., Wang, Z., Zhan, X., & Stengel, D.B. (2021). Filamentous microalgae as an advantageous co-substrate for enhanced methane production and digestate dewaterability in anaerobic co-digestion of pig manure. *Waste Management*, *119*, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.041>
34. Janssen, M., Wijffels, R.H., & Barbosa, M.J. (2022) Microalgae based production of single-cell protein. *Current Opinion in Biotechnology*, *75*, 102705. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102705>
35. Javed, F., Zimmerman, W.B., Fazal, T., Hafeez, A., Mustafa, M., Rashid, N., & Rehman, F. (2023). Green synthesis of biodiesel from microalgae cultivated in industrial wastewater via microbubble induced esterification using Bio-MOF-based heterogeneous catalyst. *Chemical Engineering Research and Design*, *189*, 707-720. <https://doi.org/189.10.1016/j.cherd.2022.12.004>.
36. Kakara, D., & Malothu, R. (2021). Biodiesel production from *Chlorella vulgaris* by media optimisation and transesterification. *International Journal of Engineering Research & Technology*, *10*(01). https://www.researchgate.net/publication/353751451_Biodiesel_Production_from_Chlorella_Vulgaris_by_Media_Optimisation_and_Transesterification_Production_of_Biodiesel_from_Chlorella_Vulgaris
37. Kim, B., Chang, Y.K., & Lee, J.W. (2017). Efficient solvothermal wet in situ transesterification of *Nannochloropsis gaditana* for biodiesel production. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *40*(5), 723–730. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1738-6>
38. Kim, J., Gousopoulos, E., Faleschini, T. M., Hamburger, M., Potterat, O., & Detmar, M. (2022). Pheophorbide a identified in an *Eupatorium perfoliatum* extract is a novel lymphatic vascular activator. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *147*, 112664. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.112664>
39. Kim, J.Y., Jung, J.M., Jung, S., Park, Y.K., Tsang, Y.F., Lin, A., Choi, Y.E., & Kwon, E. (2022). Biodiesel from microalgae: Recent progress and key challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, *93*, 101020. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2022.101020>

40. Kisielewska, M., Dębowski, M., & Zieliński, M. (2023). Comparison of biogas production from anaerobic digestion of microalgae species belonged to various taxonomic groups. *Archives of Environmental Protection*, 46(1), 33–40. <https://doi.org/10.24425/aep.2020.132523>.
41. Klassen, V., Blifernez-Klassen, O., Bax, J., & Kruse, O. (2020). Wastewater-borne microalga *Chlamydomonas* sp.: A robust chassis for efficient biomass and biomethane production applying low-N cultivation strategy. *Bioresource Technology*, 123825. doi:10.1016/j.biortech.2020.123825
42. Krishnamoorthy, A., Rodriguez, C., & Durrant, A. (2022). Sustainable approaches to microalgal pre-treatment techniques for biodiesel production: A review. *Sustainability*, 14(16), 9953. <https://doi.org/10.3390/su14169953>
43. Lee, J., Lee, K., Jang, H.M., Shin, J., Park, K.Y., Cho, J. & Kim, Y. (2017). Biomethanation and anaerobic co-digestion via microbial communities of microalgal *Hydrodictyon reticulatum* biomass residues with sewage sludge. *Desalination and Water Treatment*, 77, 185-193. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20685>
44. Li, Z., Li, Y., Zhang, X., & Tan, T. (2015). Lipid extraction from non-broken and high water content microalgae *Chlorella* spp. by three-phase partitioning. *Algal Research*, 10, 218-223. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.04.021>
45. Lookfort. (2025). Пакети вакуумні <https://lookfort.com/uk/upakovka-dlya-izhi-na-vunis/pergament-folga-plivka/vacuum-pakety-ua/>
46. Luna-delRisco, M., Normak, A., & Orupõld, K. (2011). Biochemical methane potential of different organic wastes and energy crops from Estonia. *Agronomy Research*, 9(1-2), 331-342.
47. Machado, C.A., Esteves, A.F., & Pires, J.C.M. (2024). *Chlorella vulgaris* harvesting: Chemical flocculation with chitosan, aluminum sulfate, and ferric sulfate. *Applied Sciences*, 14(2), 598. <https://doi.org/10.3390/app14020598>
48. Mahesh, R., Naira, V. R., & Maiti, S. K. (2019). Concomitant production of fatty acid methyl ester (biodiesel) and exopolysaccharides using efficient harvesting technology in flat panel photobioreactor with special sparging system via *Scenedesmus*

- abundans. *Bioresource Technology*, 278, 231–241.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.091>
49. Markou, G., Ilkiv, B., Brulé, M., Antonopoulos, D., Chakalis, L., Arapoglou, D., & Chatzipavlidis, I. (2022). Methane production through anaerobic digestion of residual microalgal biomass after the extraction of valuable compounds. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 419–426. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00703-3>
50. MedChemExpress. Pheophorbide A
<https://www.medchemexpress.eu/pheophorbide-a.html>
51. Microbial Digital Specimen Archives. (2025) *Scenedesmus abundans*. Hosei University.
52. Mittal, V., & Ghosh, U. (2023). Optimization of biodiesel production from *Spirulina* microalgae via nanocatalytic transesterification process. *Bioresource Technology Reports*, 23, 101504 <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101504>
53. Moreira, J.B., Vaz, B.d.S., Cardias, B.B., Cruz, C.G., Almeida, A.C.A.d., Costa, J.A.V., & Morais, M.G.d. (2022). Microalgae polysaccharides: An alternative source for food production and sustainable agriculture. *Polysaccharides*, 3(2), 441-457. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides3020027>
54. Naaz, F., Bhattacharya, A., Pant, K. K., & Malik, A. (2019). Investigations on energy efficiency of biomethane/biocrude production from pilot scale wastewater grown algal biomass. *Applied Energy*, 254, 113656. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113656>
55. Ndikubwimana, T., Chang, J., Xiao, Z., Shao, W., Zeng, X., Ng, I.S., & Lu, Y. (2016). Flotation: A promising microalgae harvesting and dewatering technology for biofuels production. *Biotechnology Journal*, 11(3), 15-326. <https://doi.org/10.1002/biot.201500175>
56. Ng, J. W., Teh, T. M., & Lee, C. Y. (2024). Integrating bead milling and alkaline solubilization for enhanced protein recovery from microalgae: A comprehensive approach. *Future Foods*, 9, 100385. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100385>

57. Nur, F.M.K, Idris, A., & Irfan, M. (2019). Towards efficient membrane filtration for microalgae harvesting: A review. *Jurnal Kejuruteraan, SI2(1)*, 103-112. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-si2\(1\)-13](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-si2(1)-13)
58. Panuccio, M.R., Mallamaci, C., Attinà, E., & Muscolo, A. (2021) Using digestate as fertilizer for a sustainable tomato cultivation. *Sustainability, 13(3)*, 1574. <https://doi.org/10.3390/su13031574>
59. Parimi, N.S., Singh, M., Kastner, J.R., & Das, K.C. (2015). Biomethane and biocrude oil production from protein extracted residual *Spirulina platensis*. *Energy, 93*, 697–704. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.041>
60. Parthiban, J., & Jambulingam, R. (2023). Enhancing the biodiesel production potential of *Synechococcus elongatus* and *Anabaena* cyanobacterial strain isolated from saline water using different media composition and organic carbon sources. *Sustainability, 15(1)*, 870. <https://doi.org/10.3390/su15010870>
61. Pavičić, J., Novak Mavar, K., Brkić, V., & Simon, K. (2022). Biogas and biomethane production and usage: Technology development, advantages and challenges in Europe. *Energies, 15(8)*, 2940. <https://doi.org/10.3390/en15082940>
62. Plastok. (2025). Поликарбонат BAUPR 16 мм. <https://plastok.com.ua/polikarbonat/baupr-16mm-pros1>
63. Polycarbonate. (2025). Продукти <https://polycarbonate.net.ua/catalog/cotovyj-polikarbonat>
64. Ramos, M., Almeida, M., Mota, C., Brotas, V., & Magalhães, C. (2021). Seasonal variation of dissolved organic matter dynamics in a macrotidal estuary (Tagus, Portugal). *Marine Chemistry, 236*, 103999. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2021.103999>
65. Rojo De Benito, E. M., Filipigh, A. A., & Bolado Rodríguez, S. (2023). Assisted-enzymatic hydrolysis vs chemical hydrolysis for fractional valorization of microalgae biomass. *Process Safety and Environmental Protection, 174*, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.067>

66. Roselet, F., Vandamme, D., Muylaert, K., & Abreu, P. C. (2019). Harvesting of microalgae for biomass production. In *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment* (pp. 211–243). *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8_10
67. Saide, A., Lauritano, C., & Ianora, A. (2020). Pheophorbide a: State of the art. *Marine Drugs*, 18(5), 257. <https://doi.org/10.3390/md18050257>
68. Sakthivel, R., Ramesh, K., Purnachandran, R., & Mohamed Shameer, P. (2018). A review on the properties, performance and emission aspects of the third-generation biodiesels. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 82(P3), 2970–2992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.037>
69. Sanjurjo, C., Oulego, P., Bartolomé, M., Rodriguez, E., González R., & Hernández Battez, A. (2024). Biodiesel production from the microalgae *Nannochloropsis gaditana*: Optimization of the transesterification reaction and physicochemical characterization. *Biomass and Bioenergy*, 185, 107240. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107240>.
70. Sartori, R. B., Vendruscolo, R. G., Ribeiro, S. R., Furlan, V. J. M., Wagner, R., Zepka, L. Q., & Jacob-Lopes, E. (2022). The Role of Photo-Cycles in the Modulation of Growth and Biochemical Profile of Microalgae: Part I—Food Interest Compounds. *Life*, 12(3), 462. <https://doi.org/10.3390/life12030462>
71. Schwartz, G., Van Olst, J.C., & Brune, D.E. (2015) Co-digestion of food waste and algaebiomass for biogas production. *Applied Engineering in Agriculture*, 31(6), 841–846. <https://doi.org/10.13031/aea.31.11291>
72. Selley, L., Phillips, D. H., & Mudway, I. (2019). The potential of omics approaches to elucidate mechanisms of biodiesel-induced pulmonary toxicity. *Particle and Fibre Toxicology*, 16(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s12989-018-0284-y>
73. Singh, G., & Patidar, S. K. (2018). Microalgae harvesting techniques: A review. *Journal of Environmental Management*, 217, 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.010>

74. Sivaramakrishnan, R., & Incharoensakdi, A. (2017). Production of methyl ester from two microalgae by two-step transesterification and direct transesterification. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4950–4963. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8217-5>
75. Sivaramakrishnan, R., & Incharoensakdi, A. (2017). Production of methyl ester from two microalgae by two-step transesterification and direct transesterification. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4950–4963. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8217-5>
76. Solé-Bundó, M., Eskicioglu, C., Garfí, M., Carrère, H., & Ferrer, I. (2017). Anaerobic co-digestion of microalgal biomass and wheat straw with and without thermo-alkaline pretreatment. *Bioresource Technology*, 237, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.151>
77. Solé-Bundó, M., Passos, F., Romero-Güiza, M. S., Ferrer, I., & Astals, S. (2019). Co-digestion strategies to enhance microalgae anaerobic digestion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 471–482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.036>
78. Stramarkou, M., Papadaki, S., Kyriakopoulou, K., Tzovenis, I., Chronis, M., Krokida, M., ... & Georgiadou, D. (2021). Comparative analysis of different drying techniques based on the qualitative characteristics of *Spirulina platensis* biomass. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 30(5), 498–516. <https://doi.org/10.1080/10498850.2021.1900969>
79. Sumprasit, N., Wagle, N., Glanpracha, N., & Annachhatre, A.P. (2017). Biodiesel and biogas recovery from *Spirulina platensis*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.006>
80. Tabletki.ua. Загальноозміцнюючі <https://tabletki.ua/uk/category/2232/>
81. Torres, A., Fermoso, F.G., Neumann, P., Azocar, L., & Nuñez, D.J. (2015). Anaerobic digestion as a tool for resource recovery from a biodiesel production process from microalgae. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 9(3), 342–349. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2015.1522>

82. Torres, A., Padrino, S., Brito, A., & Díaz, L. (2023). Biogas production from anaerobic digestion of solid microalgae residues generated on different processes of microalgae-to-biofuel production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 4659–4672. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01898-9>
83. Vargas-Estrada, L., Longoria, A., Arenas, E., Moreira, J., Okoye, P.U., Bustos-Terrones, Y., & Sebastian, P.J. (2022). A review on current trends in biogas production from microalgae biomass and microalgae waste by anaerobic digestion and co-digestion. *BioEnergy Research*, 15, 77–92. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10276-2>
84. Vlasiuk, N. (2024). Biomethane – green fuel of the future and key to energy independence for Ukraine. Ukrainian Climate Office. <https://ukrainian-climate-office.org/en/biomethane-green-fuel-of-the-future-and-key-to-energy-independence-for-ukraine/>
85. Volza FZ-LLC. (2025). Bio Diesel import in Ukraine. Volza. <https://www.volza.com/p/bio-diesel/import/import-in-ukraine/>
86. Wang, M., & Park, C. (2015). Investigation of anaerobic digestion of *Chlorella* sp. and *Micractinium* sp. grown in high-nitrogen wastewater and their co-digestion with waste activated sludge. *Biomass and Bioenergy*, 80, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.028>
87. Wang, Y., Tibbetts, S. M., & McGinn, P. J. (2021). Microalgae as Sources of High-Quality Protein for Human Food and Protein Supplements. *Foods*, 10(12), 3002. <https://doi.org/10.3390/foods10123002>
88. Watkins, J. D., Abdellaoui, H., Barton, E., Lords, C., & Sims, R. C. (2025). Dataset: Compositional analysis and hydrothermal liquefaction of a high-ash microalgae biofilm. *Data in Brief*, 42, 111490. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111490>
89. Wu, H., Li, J., Wang, C., Liao, Q., Fu, Q., & Liu, Z. (2020). Sequent production of proteins and biogas from *Chlorella* sp. via CO₂ assisted hydrothermal treatment and anaerobic digestion. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123563. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123563>

90. Yang, Z.Y., Gao, F., Liu, J., Yang, J.S., Liu, M., Ge, Y.M., Chen, D. Z., & Chen, J.M. (2021). Improving sedimentation and lipid production of microalgae in the photobioreactor using saline wastewater. *Bioresource Technology*, 347, 126392. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126392>.
91. Ymin, C., Changan, X. (2021). How to narrow the CO₂ gap from growth-optimal to flue gas levels by using microalgae for carbon capture and sustainable biomass production. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124448. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124448>
92. Zabed, H. M., Akter, S., Yun, J., Zhang, G., Zhang, Y., & Qi, X. (2020). Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109503>
93. Zerno-UA. (2021). *Хлорела — вирушила в поле*. Отримано з <https://www.zerno-ua.com/journals/2021/berezen-2021/hlorela-virushila-v-pole/>
94. Zhao, W., Duan, M., Zhang, X., & Tan, T. (2018). A mild extraction and separation procedure of polysaccharide, lipid, chlorophyll and protein from *Chlorella* spp. *Renewable Energy*, 118, 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.046>
95. Zhen, G., Lu, X., Kobayashi, T., Kumar, G., & Xu, K. (2016). Anaerobic co-digestion on improving methane production from mixed microalgae (*Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp.) and food waste: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 299, 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.118>
96. Біоенергетична асоціація України (UABIO). Біогаз та біометан. UABIO. <https://uabio.org/biogas-and-biomethane/>
97. Біоенергетична асоціація України. Рідкі біопалива: біоетанол та біодизель. <https://uabio.org/liquid-biofuels/>
98. Верховна Рада України. (2025). Закон України — Кодекс газотранспортної системи (з1378-15). Законодавство України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text>
99. Гелетуха, Г., Желєзна, Т., Драгнєв, С., Кучерук, П., & Крамар, В. (2025). Аналітична записка № 1: Виробництво передового біометану з проміжних і

покривних культур. Київ: Громадська спілка «Біоенергетична асоціація України»
<https://uabio.org/materials/17871/>

100. Драгнев, С. «Можливості та потенціал споживання біометану в аграрному секторі України». Біоенергетична асоціація України.
<https://uabio.org/news/17950/>

101. ДСТУ 7911:2015. (2015). Добрива органічні та органо-мінеральні. Методи визначення сумарної масової частки азоту та масової частки амонійного азоту

102. ДСТУ EN 12662:2022. (2022). Рідкі нафтопродукти. Визначення загального забруднення середніх дистилатів, дизельного палива та метилових ефірів жирних кислот (EN 12662:2014, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

103. ДСТУ EN 14104:2009. (2009). Похідні жирів та олій. Метилові ефіри жирних кислот. Метод визначення кислотного числа (EN 14104:2003, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

104. ДСТУ EN 14105:2009. (2009). Похідні жирів та олій. Метилові ефіри жирних кислот. Метод визначення вільного та загального гліцерину й моно-, ди- та тригліцеридів (контрольний метод) (EN 14105:2003, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

105. ДСТУ EN 14107:2009. (2009). Похідні жирів та олій. Метилові ефіри жирних кислот. Метод визначення вмісту фосфору емісійною спектрометрією з індуктивно наведеною плазмою (EN 14107:2003, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

106. ДСТУ EN 14111:2009. (2009). Похідні жирів та олій. Метилові ефіри жирних кислот. Метод визначення йодного числа (EN 14111:2003, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

107. ДСТУ EN 14112:2009. (2009). Похідні жирів та олій. Метилові ефіри жирних кислот. Метод визначення стійкості до окиснення (прискорений метод) (EN 14112:2003, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

108. ДСТУ EN ISO 10370:2012. (2012). Нафтопродукти. Визначення коксового залишку мікрометодом (EN ISO 10370:1996, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

109. ДСТУ EN ISO 2160:2012. (2012). Нафтопродукти. Метод визначення корозійної дії на мідну пластинку (EN ISO 2160:1998, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

110. ДСТУ EN ISO 3104:2022. (2022). Нафтопродукти. Прозорі та непрозорі рідини. Визначення кінематичної в'язкості та обчислення динамічної в'язкості (EN ISO 3104:2020, IDT; ISO 3104:2020, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

111. ДСТУ EN ISO 3675:2012. (2012). Нафта сира та нафтопродукти рідкі. Метод лабораторного визначення густини ареометром (EN ISO 3675:1998, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

112. ДСТУ EN ISO 3679:2024. (2024). Визначення температури спалаху. Метод випробування здатності до спалаху в закритому тиглі малого розміру (EN ISO 3679:2022, IDT; ISO 3679:2022, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

113. ДСТУ EN ISO 5165:2022. (2022). Нафтопродукти. Визначення якості запалювання дизельного палива. Метод цетанового двигуна (EN ISO 5165:2020, IDT; ISO 5165:2020, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

114. ДСТУ ISO 12937:2012. (2012). Нафтопродукти. Визначення води методом кулонометричного титрування за Карлом Фішером (ISO 12937:2000, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

115. ДСТУ ISO 3987:2019. (2019). Нафтопродукти. Визначення масової частки сульфатної золи в мастильних оливах і добавках (ISO 3987:2010, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

116. ДСТУ ISO 6496:2005. (2005). Корми для тварин. Визначення вологи та інших летких речовин. ДП «УкрНДНЦ».

117. Ізотов, І. (2024). Через російські удари по Полтавщині Україна втратила 60 % видобутку газу — Bloomberg. Суспільне. Отримано з <https://suspilne.media/poltava/1134786-cerez-rosijski-udari-po-poltavsini-ukraina-vtratila-60-vidobutku-gazu-bloomberg/>

118. Карлаш, Ю. В., & Красінько, В. О. (2022). Основи проектування біотехнологічних виробництв [Електронний навчальний посібник]. К.: НУХТ. ISBN 978-966-612-278-3

119. Крамар, В. (2025). Виробництво та логістика біометану як моторного палива: технічні та економічні аспекти. *Біоенергетична асоціація України*. <https://uabio.org/materials/17572/>

120. Пластимет. (2025). Переваги та недоліки теплиць з полікарбонату. <https://plastimet.in.ua/ua/a478650-preimuschestva-nedostatki-teplits.html>

121. ХарПласт. (2025) Банка 3000 мл з гвинтовою кришкою <https://kharplast.com/jar-3000-ml-with-screw-cap>

122. Чурилова, К. (2025). Першу в Україні ліцензію на виробництво біодизелю отримали фермери зі Львівщини. ZAXID.NET. https://zaxid.net/pershu_v_ukrayini_litsenziyu_na_virobnitstvo_biodizelyu_otrimalo_agro_pidpriyemstvo_zi_lvivshhini_n1613382

123. Шапошніков Д. (2025). Виробництво біометану в Україні: скільки продали за кордон та які його перспективи у майбутньому. Суспільне Чернігів. <https://suspilne.media/chernihiv/969965-virobnictvo-biometanu-v-ukraini-skilki-prodali-za-kordon-ta-aki-jogo-perspektivi-u-majbutnomu>