

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С.З. Гжицького

Факультет харчових технологій та біотехнологій

(повна назва факультету)

Кафедра біотехнологій та радіології

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

на тему: “Інноваційні підходи щодо культивування
мікроводоростей як продуцентів біопалива III покоління”

Виконав: студент 2 курсу, групи 1
спеціальності

G 21 «Біотехнологія та біоінженерія»

за ОПП «Біотехнологія та біоенергетика»

Козачок Володимир Сергійович

(прізвище та ініціали)

Керівник: **проф. Буцяк В.І.**

(прізвище та ініціали)

Рецензент: **Філіпов С.І.**

(прізвище та ініціали)

Кваліфікаційну роботу магістра розглянуто на попередньому захисті,
протокол № від 2025 р. Допуск до захисту даної роботи в
Екзаменаційній комісії рекомендовано.

Завідувач кафедри, проф.

Василь БУЦЯК

Львів – 2025

Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій імені С.З. Гжицького
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення факультет харчових технологій та
біотехнологій

Кафедра, циклова комісія кафедра біотехнології та радіології

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

(шифр і назва)

Спеціальність G 21 «Біотехнології та біоінженерія»

ОПП Біотехнології та біоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри, голова

циклової комісії В.І.Буцяк

“ ” 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Козачоку Володимирі Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи “Інноваційні підходи щодо культивування мікроводоростей як продуцентів біопалива III покоління”

Керівник магістерської роботи

Буцяк Василь Іванович, професор

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 20.06.2025 року №497-4

2. Строк подання магістерської роботи 18.11.2025 року

3. Вихідні дані до магістерської роботи

Вихідні матеріали до виконання роботи: фотобіореактори, популяції мікроводоростей, відкриті та закриті водойми, оптимізація технологічних параметрів культивування, гібридні установки, біопаливо, біодзель, поновлювальні джерела енергії.

4. Зміст магістерської роботи (перелік питань, які потрібно розробити) вступ, огляд літератури, матеріал та методи досліджень, результати власних досліджень, висновки та пропозиції, додатки, список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) графіки, діаграми, рисунки, технологічні схеми, технологічні лінії), рисунки: ставкові та закриті фітобіореактори, генеологічна структура мікроводоростей, лабораторна установка вирощування водоростей за умов

надходження різної кількості вуглекислого газу, загальна схема виробництва біодизелю із мікроводоростей, цикл виробництва біопалива III покоління – біодизелю, порівняльна характеристика продуктивності олії мікроводоростями та рослинами, будова типового фітобіореактора для вирощування мікроводоростей та ємкості подані в розрізі.

Схеми: схема автоматичного контролю за основними параметрами культивування, регламентна технологічна схема одержання біопалива III покоління (біодизелю) із використанням біомаси мікроводоростей, опис основних ланок технологічного процесу виробництва біодизелю із мікроводоростей, одержання біодизелю за класичною технологічною схемою з використанням біомаси мікроводоростей, схема основних ланок технології виробництва біопалива III покоління, циклічна технологія одержання біодизелю із використанням каталізаторів, безперервної багатореакторної технології одержання біодизеля.

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Консультант ПІБ, посада	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1.Літературний огляд.	проф. Буцяк В.І.		
2.Методика експерименту та основні методи досліджень.	проф. Буцяк В.І.		
3.Експериментальна частина.	проф. Буцяк В.І.		
5.Висновки та пропозиції	проф. Буцяк В.І.		

7. Дата видачі завдання 10.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання	примітка
1.	Літературний огляд.		
	I атестація:	06.10.25р.	30%
2.	Методика експерименту та основні методи досліджень.		20%
3.	Експериментальна частина.		35%
	II атестація:	07.11.25р.	55%
5.	Висновки та пропозиції		5%
	III атестація:	18.11.25р.	15%
	Допущено до захисту.	10.12.25р.	100%

Здобувач

Володимир КОЗАЧОК
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи

Василь БУЦЯК
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1. Історія досліджень мікроводоростей як продуцентів джерела енергії	11
1.1.1. Характеристика та методи вирощування мікроводоростей	13
1.2. Біологічні особливості мікроводоростей	15
1.3. Характеристика основних типових систем культивування мікроводоростей	18
1.4. Заходи щодо оптимізації нагромадження біомаси мікроводоростей як базового субстрату біопалива III покоління	21
1.5. Вітчизняні та зарубіжні приклади реалізованих проектів щодо отримання біопалива III покоління	25
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	31
2.1. Опис технологічної схеми та процесу одержання біодизелю з мікроводоростей	31
2.2. Матеріал і методи	39
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	41
3.1. Особливості технологічного процесу одержання біопалива з мікроводоростей	41
3.2. Мікроводорості як альтернативне джерело біопалива III покоління	46
3.3. Технологічні підходи щодо збільшення нагромадження біомаси мікроводоростей як продуцентів біопалива III покоління	55
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	63
ДОДАТКИ	68

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота обсягом 71 сторінка, складається із вступу огляду літературних джерел, матеріал та методів досліджень, власних досліджень, висновків та пропозицій, списку літератури, додатків та містить 45 літературних джерел, 21 рисуноків, 7 таблиць та 4 додатки.

Ключові слова: фотобіореактори, популяції мікроводоростей, відкриті та закриті водойми, оптимізація технологічних параметрів культивування, гібридні установки, біопаливо, біодзель, поновлювальні джерела енергії.

У кваліфікаційній роботі здійснено детальний аналіз сучасних тенденцій та інноваційних методів культивування мікроводоростей з метою виробництва біопалива III покоління. Особливу увагу приділено біологічним характеристикам перспективних видів мікроводоростей, різновидам культивувальних систем (фотобіореактори, відкриті водойми, гібридні установки), технологіям оптимізації умов зростання (інтенсивність освітлення, температура, концентрація CO₂, джерела азоту та фосфору), а також економічним, екологічним та соціальним аспектам застосування цієї біотехнології.

Освітлення фітобіореактора має одне із найбільш важливих значень для нагромадження біомаси мікроводоростей, як одного із основних факторів процесу фотосинтезу. Наведено дані щодо динаміки синтезу біомаси мікроводоростей залежно від джерела світла та його спектрів за умов 12:12 годин світлового циклу.

Найбільш активно відбувалась проліферація клітин за умови, коли використовували комбіноване освітлення із використанням червоного та синього спектрів, при цьому кількість біомаси на 18 добу експерименту складала 0,58 г/дм³, що на 48,3% переважав контроль. За використанням у технологічному процесі тільки природного світла, за цей самий час

експерименту, приріст популяції мікроорганізмів був рівним 0,48 г/дм³, що на 17,3% був меншим за аналогічні показники 1 зразка, однак перевищував контроль на 31,5%.

Об'єкти дослідження – популяції мікроводоростей, фітобіореактори, режими культивування, основні ланки технології отримання біодизелю, компоненти біомаси мікроводоростей.

Предмет дослідження – інноваційні підходи щодо оптимізації отримання біодизелю на основі мікроводоростей.

Мета роботи – узагальнення новітніх досягнень у сфері культивування мікроводоростей, аналіз інноваційних підходів щодо оптимізації виробництва біопалива III покоління.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі **завдання**:

- аналіз літературних джерел щодо історії досліджень мікроводоростей як продуцентів джерела енергії, загальної характеристики методів вирощування мікроводоростей та біологічних особливостей мікроводоростей;
- охарактеризувати основні типові вітчизняні та зарубіжні системи культивування мікроводоростей, навести приклади реалізованих проєктів щодо отримання біопалива III покоління;
- проаналізувати заходи щодо оптимізації нагромадження біомаси мікроводоростей як базового субстрату для виробництва біопалива III покоління;
- навести опис технологічної регламентної схеми та основних ланок виробничого процесу одержання біодизелю з мікроводоростей та дати обґрунтування щодо виробництва та використання біопалива третього покоління;

- подати апаратурне забезпечення та принципові схеми технологічного процесу виробництва біодизелю як біопалива III покоління;
- провести оптимізацію технологічного процесу щодо активації проліферації популяцій мікроводоростей з метою зростання біомаси та ліпідного компоненту шляхом оптимізації освітлення, джерел Нітрогенного та Карбонового живлення;
- подати технологічну схему безвідходного виробництва біопалива III покоління та схему безвідходної кооперації одержання біогазу та культивування мікроорганізмів із використанням рідкої фракції дигестату для базового субстрату.

Актуальність теми. Актуальність теми полягає у необхідності розробки та впровадження ефективних, екологічно безпечних і економічно обґрунтованих підходів до отримання відновлюваної енергії. В умовах глобальних змін клімату, енергетичних криз та деградації природних ресурсів розвиток біоенергетики на основі мікроводоростей відкриває нові горизонти для сталого розвитку та технологічного прориву у сфері зеленої енергетики. Вивчення інноваційних аспектів культивування мікроводоростей та можливості їхньої інтеграції у виробничі біотехнологічні комплекси є актуальним завданням сучасної науки та промисловості.

Крім того, значну перспективу представляє інтеграція культивування мікроводоростей з промисловими і сільськогосподарськими потоками відходів – використання вуглекислого газу зі стічних газів, поживних речовин із стічних вод, а також відпрацьованих матеріалів, що забезпечує не лише зниження вартості сировини, але й позитивний екологічний ефект за рахунок зменшення забруднень. Такий підхід створює умови для комплексного вирішення проблем енергетики, сільського господарства і екології.

Науковий внесок роботи. Проведений аналіз наукових досліджень і технологічних розробок свідчить, що сучасні методи культивування мікроводоростей дедалі більше базуються на міждисциплінарних підходах. Поєднання генетичної інженерії, біоінформатики, матеріалознавства, інженерії фотобіореакторів та автоматизованих систем керування відкриває нові горизонти для підвищення ефективності виробництва. Так, розробка генетично модифікованих штамів з підвищеним вмістом ліпідів, швидким ростом і стійкістю до стресових факторів дозволяє значно збільшити вихід біомаси і якість сировини для переробки

Практична цінність роботи. Враховуючи отримані експериментальні дані в лабораторних умовах, рахуємо, що є доцільним у поживне середовище вносити 4 г/л вуглеводного компоненту – меляси в перерахунку на глюкозу, а також 2,0 г/л хлориду амоніаку, яке забезпечить зростання ліпідних фракцій в отриманій біомасі мікроводоростей.

ВСТУП

У сучасному світі питання енергетичної безпеки, сталого розвитку та охорони довкілля набули пріоритетного значення в науковому, промисловому та політичному контекстах. Постійне зростання попиту на енергетичні ресурси, виснаження традиційних джерел пального (нафти, природного газу, вугілля), зростання цін на енергоносії та негативні екологічні наслідки використання викопного палива – всі ці фактори зумовлюють пошук альтернативних, екологічно безпечних та відновлюваних джерел енергії [1].

У цьому контексті значний науковий і практичний інтерес викликає виробництво біопалива, зокрема біопалива третього покоління, яке базується на використанні мікроводоростей як джерела біомаси.

Мікроводорості – це надзвичайно перспективні об'єкти біотехнології завдяки своїм біологічним особливостям, високій продуктивності фотосинтезу, здатності акумулювати ліпіди, вуглеводи та білки, а також можливості культивування у різноманітних умовах, включно з використанням стічних вод або промислових газів. Завдяки цим властивостям мікроводорості розглядаються як ефективна сировина для виробництва біодизеля, біоетанолу, біогазу, а також як джерело цінних біологічно активних речовин, кормових добавок та добрив [2].

Біопаливо третього покоління має низку переваг над традиційним біопаливом першого (з харчових культур) і другого (з відходів сільського господарства та деревини) поколінь. Зокрема, мікроводорості не конкурують за родючі землі з продовольчими культурами, мають набагато вищий рівень накопичення олійної біомаси, забезпечують значно вищу врожайність з одиниці площі та дозволяють зменшити викиди парникових газів [4].

Крім того, процес культивування мікроводоростей може супроводжуватися біологічним очищенням води та повітря, що робить цю технологію привабливою з точки зору концепції циркулярної економіки.

Однак, попри численні переваги, широке впровадження технологій вирощування мікроводоростей для виробництва біопалива стикається з низкою наукових, технічних та економічних бар'єрів. Серед них – висока собівартість біопалива, обмеження у масштабуванні біореакторів, енерговитратність процесів екстракції ліпідів, необхідність оптимізації умов культивування, добору штамів з високим рівнем продукції олій тощо [3].

Саме тому останніми роками активно досліджуються інноваційні підходи до вирощування мікроводоростей – застосування генної інженерії, автоматизованих систем керування, комбінованих біореакторів, нових систем освітлення та живлення, а також інтеграція цих процесів у замкнуті екосистеми.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Історія досліджень мікроводоростей як продуцентів джерела енергії

Сучасний розвиток світової енергетики та нагальні екологічні проблеми ставлять перед науковцями і технологами завдання пошуку альтернативних, відновлюваних і екологічно безпечних джерел енергії. У цьому контексті біопаливо третього покоління, зокрема біопаливо, вироблене з мікроводоростей, набуває особливого значення. Мікроводорості вирізняються високою продуктивністю біомаси, здатністю накопичувати цінні ліпіди, а також можливістю ефективного використання вуглекислого газу, поживних речовин і забруднених середовищ [6].

У ХХІ столітті людство зіткнулося з необхідністю пошуку альтернативних джерел енергії через вичерпність традиційних ресурсів, екологічні проблеми та зростання енергетичних потреб. Найбільш перспективним в цьому напрямку є біопаливо третього покоління, продуцентом якого є мікроводорості (рис 1.1).



Рис. 1.1. Базові субстрати для одержання біопалива I, II та III покоління [5].

Ця технологія привертає дедалі більшу увагу наукової спільноти та промислових інвесторів завдяки своїм унікальним властивостям. У даному розділі представлено аналіз ключових літературних джерел, присвячених тематиці культивування мікроводоростей та виробництва біопалива III покоління.

Перші спроби використання мікроводоростей (рис.1.2) як джерела біомаси для енергетичних цілей датуються ще 1950-ми роками, коли в США було започатковано програму *Aquatic Species Program* (ASP), яка тривала до 1996 року. У ході цієї програми було вивчено понад 3000 штамів мікроводоростей, здатних накопичувати ліпіди, з яких можна виробляти біодизель. Програму припинили через високі витрати, але вона заклала фундамент для подальших досліджень [7].

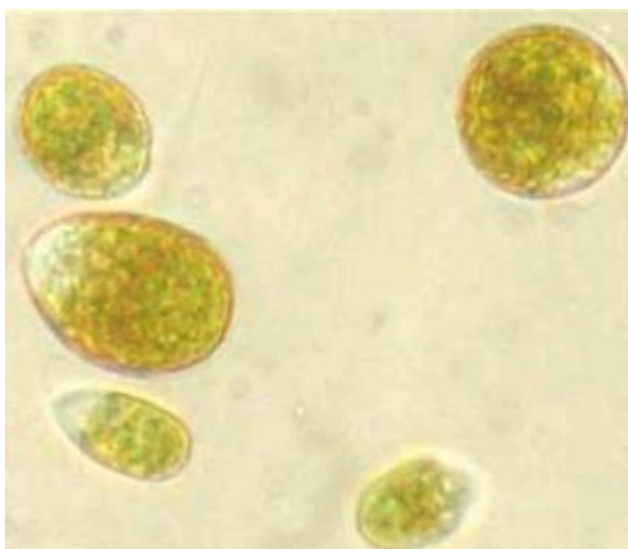


Рис. 1.2. Фото мікроводорості – продуцента біопалива третього покоління [8].

З кінця 2000-х років, на фоні нафтової кризи та зміни клімату, інтерес до мікроводоростей знову зріс. Наукові публікації, зокрема праці *Chisti (2007)*, *Mata et al. (2010)*, *Brennan & Owende (2010)*, систематизували знання про продуктивність мікроводоростей, їх культивування, екстракцію ліпідів і виробництво біопалива.

1.1.1. Характеристика та методи вирощування мікроводоростей

У численних джерелах наголошується, що мікроводорості мають значні переваги порівняно з наземними рослинами – вони мають вищу швидкість росту, не потребують сільськогосподарських угідь, можуть культивуватися на солоній або стічній воді, а вміст ліпідів у деяких видів (наприклад, *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis sp.*) досягає 50–70% від сухої маси (табл.1.1). Це робить їх надзвичайно привабливими продуцентами біопалива.

Таблиця. 1.1

Динаміка нагромадження протеїнів, ліпідів та вуглеводів різними видами мікроводоростей. %сухої речовини [9].

Вид	Білки	Вуглеводи	Ліпіди
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8-18	21-52	16-40
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Spirogyra sp.</i>	6-20	33-64	11-21
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20
<i>Prymnesium parvum</i>	28-45	25-33	22-38
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	5-10
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6-8
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4-7

У літературі описані два основні підходи до вирощування мікроводоростей: відкриті системи (наприклад, ставкові біореактори) та закриті фотобіореактори (рис.1.3). Відкриті системи дешевші, але менш

контрольовані, тоді як фотобіореактори дозволяють досягати стабільного росту, високої продуктивності й захисту від забруднень (Ugwu *et al.*, 2008; Griffiths & Harrison, 2009).

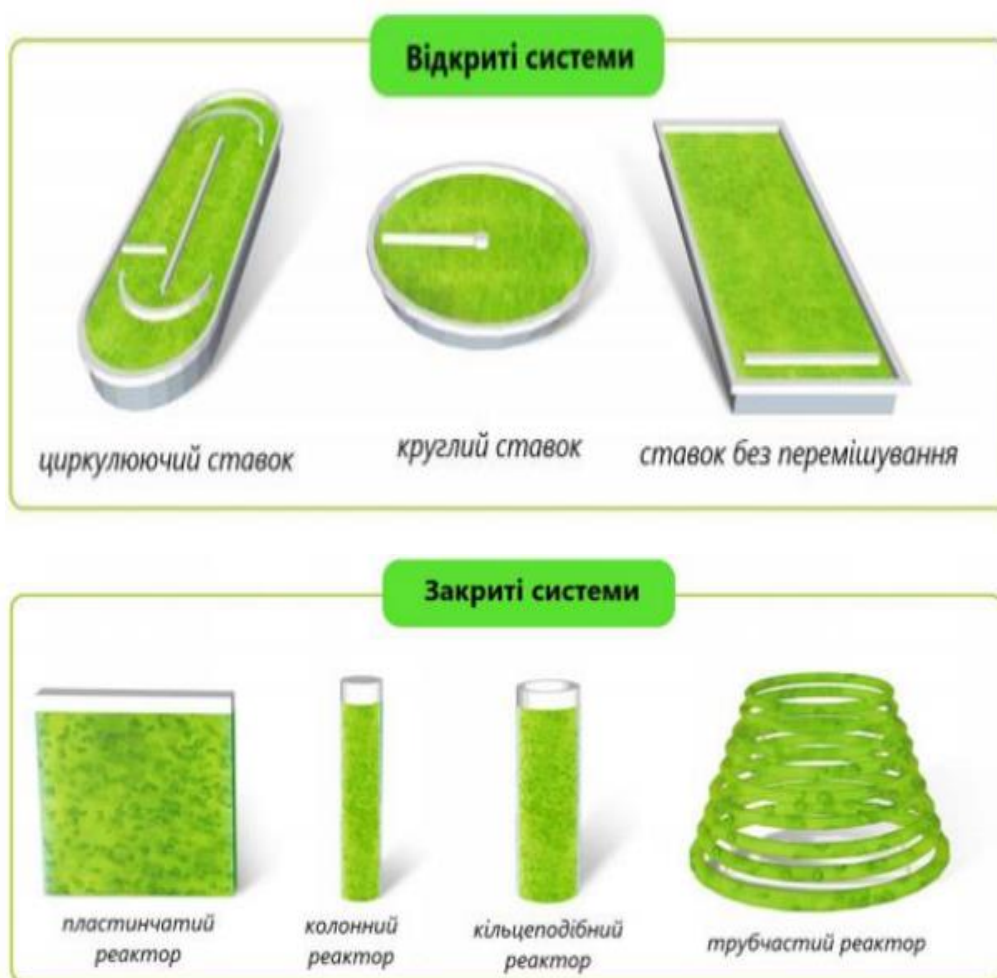


Рис. 1.3. Ставкові та закриті фітобіореактори [12].

1.2. Біологічні особливості мікроводоростей

Мікроводорості – це фотосинтезуючі мікроорганізми, що належать до різних таксономічних груп, включаючи синьо-зелені (ціанобактерії), зелені, діатомові, золотисті та інші типи водоростей. Вони мають здатність швидко накопичувати біомасу, збагачену ліпідами, вуглеводами та білками, що робить їх перспективними організмами для використання у виробництві біопалива третього покоління [10].

Їхні біологічні характеристики, екологічна пластичність і високий рівень фотосинтетичної ефективності дають змогу адаптуватися до різних умов середовища та оптимізувати процес вирощування під задані технологічні цілі.

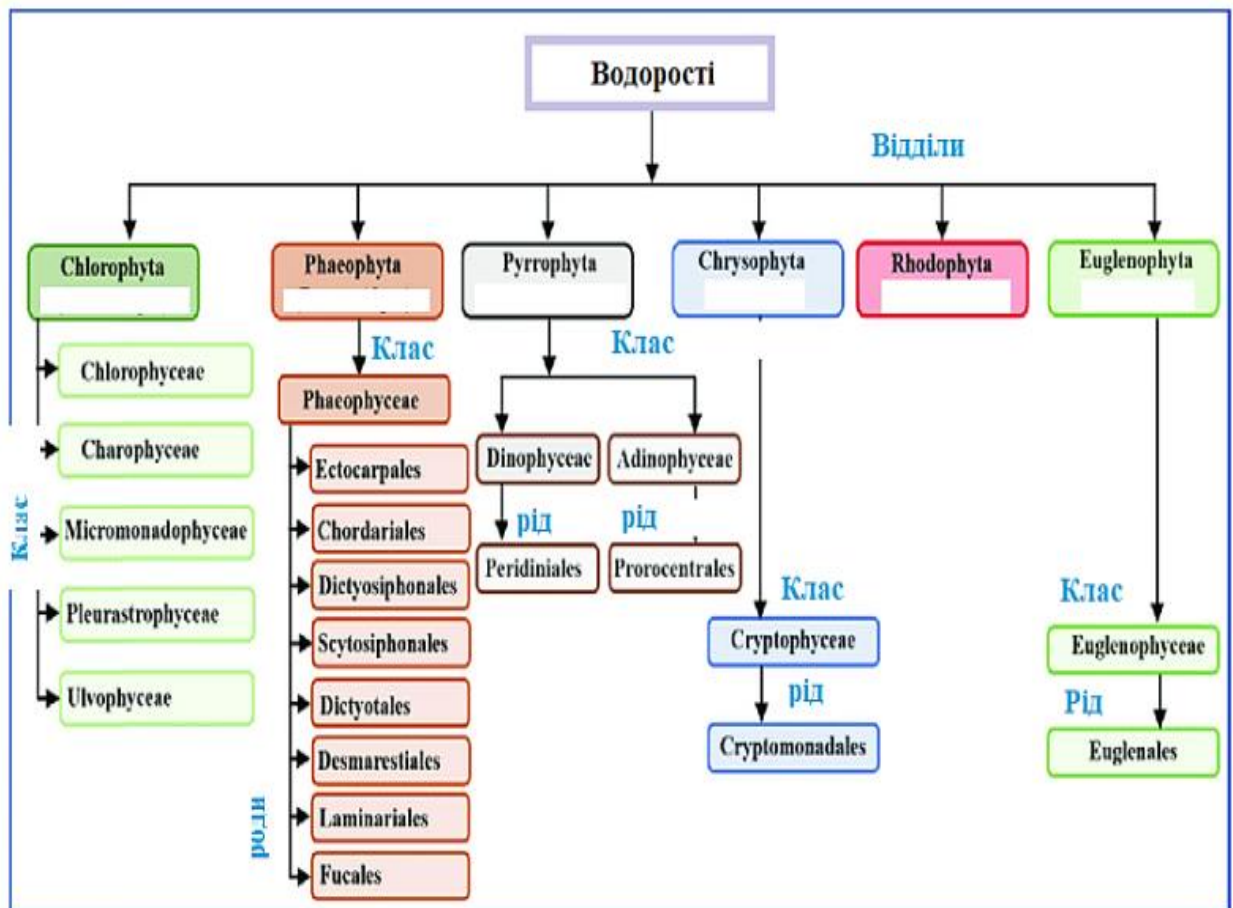


Рис. 1.4. Генеологічна структура мікроводоростей [11].

Мікроводорості проявляють різні типи трофічних стратегій: фотоавтотрофна – основний механізм живлення, при якому CO_2

перетворюється на органічні речовини за рахунок сонячного світла; гетеротрофна – деякі види здатні засвоювати органічні субстрати (наприклад, глюкозу) в темряві та міксотрофна – поєднання двох попередніх стратегій, що забезпечує підвищену продуктивність (рис.1.4).

Ця метаболічна гнучкість дозволяє адаптувати культивування до ресурсних можливостей і впроваджувати економічно вигідні біотехнологічні схеми.

Мікроводорості здатні до дуже швидкого росту – подвоєння біомаси може відбуватися кожні 24 години, а іноді й швидше (табл.1.2).

Таблиця 1.2.

Порівняльна характеристика впродовж року щодо одержання олії із с.-г. культур та мікрроводоростей, л/га [16].

Джерело олії	Річний вихід олії, л/га
Кукурудза	160...170
Соя	440...460
Соняшник	950...1000
Рапс	1100...1200
Кокосова пальма	2600...2700
Пальмова олія	5900...6000
Мікрроводорості (досягнуті показники)	17 300
Мікрроводорості (теоретичні лабораторні показники)	
до 30 % мас. олії в біомасі	46 800...58 700
до 70 % мас. олії в біомасі	140 000...158 000

Фактори, що впливають на ріст: інтенсивність освітлення; температура середовища (зазвичай 20–30°C); концентрація поживних речовин (азот, фосфор, залізо) та рН і солість середовища [13].

Під оптимальними умовами біомаса може досягати 20–60 г сухої маси на літр за кілька днів. Деякі види здатні накопичувати до 50% сухої маси у вигляді ліпідів, що особливо важливо для виробництва біодизеля.

Окрім ліпідів, мікрроводорості також продукують: пігменти (каротиноїди, фікобіліни, хлорофіли); антиоксиданти; полісахариди; вітаміни групи В; ферменти та амінокислоти тощо.

Це відкриває перспективу біоінтегрованих підходів, де з однієї біомаси одночасно можна отримувати біопаливо, біоактивні речовини та корисні побічні продукти [14].

Мікрободорості здатні адаптуватися до екстремальних умов: підвищеної температури, змін рН, засоленості, обмеження доступу до поживних речовин. Це робить їх придатними до використання в біореакторах, на відкритих ставках, навіть з використанням стічних вод як джерела поживних речовин. Цей аспект є ключовим у розробці безвідходних і сталих біотехнологій.

1.3. Характеристика основних типових систем культивування мікроводоростей

Культивування мікроводоростей як продуцентів біомаси для отримання біопалива III покоління є ключовим етапом у біотехнологічному ланцюгу виробництва. Ефективне вирощування цих мікроорганізмів визначає продуктивність процесу, якість одержуваної сировини та економічну доцільність всієї технології.

Розглянемо основні методи культивування мікроводоростей, їх особливості, переваги та недоліки, а також вплив різних параметрів на процес вирощування.

Методи культивування мікроводоростей класифікуються переважно за типом середовища та конструкцією систем [15]:

Відкриті системи культивування – це найбільш простий та дешевий метод вирощування мікроводоростей, що реалізується в штучно створених водоймах (наприклад, відкритих ставках, каналоподібних басейнах – *raceway ponds*). Вони є зручними для вирощування видів, стійких до контамінації (наприклад, *Spirulina* чи *Dunaliella salina*).

Переваги: низькі капітальні витрати; простота обслуговування та можливість використання сонячного світла як основного джерела енергії.

Недоліки: обмежений контроль умов вирощування; високий ризик забруднення (бактерії, інші водорості); низька щільність біомаси; значна залежність від погодних умов.

Закриті системи (фотобіореактори) – це спеціалізовані герметичні установки (трубчасті, колонні, панельні), які забезпечують повний контроль над умовами вирощування: освітленням, температурою, рН, подачею CO₂ та видаленням кисню. Вони дозволяють вирощувати мікроводорості з високою продуктивністю.

Переваги: стерильність середовища, мінімальний ризик контамінації; висока щільність клітинної маси; можливість вирощування вибагливих або генетично модифікованих штамів; автоматизація процесів.

Недоліки: висока вартість обладнання та експлуатації; обмежена масштабованість на ранніх етапах; необхідність постійного технічного контролю.

Мікродорості можуть культивуватися у трьох основних режимах [17]:

Автотрофний режим – цей режим передбачає використання мікродоростями світла як джерела енергії та неорганічного вуглецю (CO_2) як джерела вуглецю. Автотрофне культивування найчастіше застосовується у відкритих системах.

Гетеротрофне вирощування базується на використанні органічних сполук (наприклад, глюкози) як джерела вуглецю. У цьому випадку світло не є обов'язковим. Цей режим забезпечує швидке накопичення біомаси, але підвищує вартість сировини.

Міксотрофний режим – комбінує переваги автотрофного і гетеротрофного режимів: одночасне використання світла та органічного субстрату. Це дозволяє значно підвищити продуктивність, хоча і вимагає складнішого контролю параметрів.

Для досягнення максимальної продуктивності культивування мікродоростей необхідно оптимізувати низку параметрів [18]:

- освітлення: інтенсивність, спектр та тривалість світлового впливу. Для більшості видів ідеальним є світло з довжиною хвилі 450–680 нм;
- температура: більшість мікродоростей оптимально росте при температурі 20–30 °C;
- рН середовища: оптимальні значення – 7–8, хоча деякі види витримують коливання до 10;
- аерація та подача CO_2 : забезпечують належну фотосинтетичну активність;
- мінеральне живлення: мікро- та макроеlementи (N, P, K, Mg, Fe, Mn тощо) мають значний вплив на синтез ліпідів та білків.

Одним з інноваційних підходів є використання стічних вод або агропромислових відходів як середовища для культивування мікроводоростей. Такий підхід дозволяє зменшити витрати, водночас вирішуючи екологічні проблеми. Наприклад, *Chlorella vulgaris* активно культивується у стічних водах, поглинаючи азот і фосфор.

Перехід від лабораторного до промислового культивування є складним завданням, що вимагає адаптації технології до великого обсягу продукції. Масштабування пов'язане з [19]:

- підвищенням енерговитрат;
- необхідністю ефективного теплообміну;
- потребою в автоматизованих системах збору та обробки біомаси;
- стабілізацією продуктивності при мінімальних коливаннях зовнішніх факторів.

Методи культивування мікроводоростей є критично важливими для розвитку технологій біопалива третього покоління. Вибір між відкритими системами та фотобіореакторами залежить від типу мікроводоростей, цільового продукту (біодизель, біометан, біоетанол тощо) та економічної доцільності. Сучасні дослідження зосереджені на оптимізації умов вирощування, удосконаленні біореакторів та адаптації до використання вторинної сировини. Тільки поєднання технологічних, екологічних і економічних підходів дозволить зробити виробництво біопалива з мікроводоростей ефективним та масштабованим [20].

Інноваційні підходи включають: використання LED-освітлення зі специфічною довжиною хвилі для стимулювання синтезу ліпідів; генно-інженерну модифікацію штамів для підвищення вмісту тригліцеридів; застосування багатоступеневих біореакторів для збільшення щільності біомаси та автоматизацію процесу культивування (рис. 1.4).

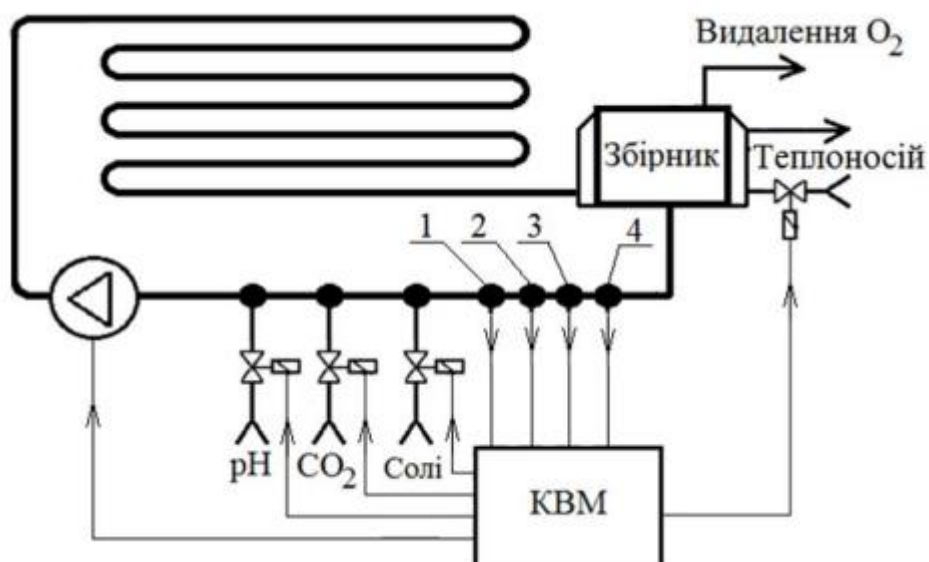


Рис. 1.5. Схема автоматичного контролю за основними параметрами культивування (температурою, вмістом CO_2 , освітленням, щільністю популяції та елементами мінерального живлення) [21]

Загалом, інноваційні підходи до культивування мікробіодоростей мають величезний потенціал для розвитку стійкої біоенергетики, зниження негативного впливу на довкілля і створення нових технологічних і економічних моделей.

Цей напрям є не лише науково перспективним, а й життєво необхідним у контексті глобальних викликів зміни клімату, енергетичної безпеки та раціонального використання ресурсів. Тому подальші дослідження і інновації у сфері культивування мікробіодоростей варто розглядати як пріоритетні завдання світової біотехнологічної науки та практики.

Водночас, незважаючи на значний прогрес, існують суттєві виклики, пов'язані з масштабуванням, стабільністю продуктивності, вартістю збору та переробки біомаси, а також з регуляторними та ринковими обмеженнями. Подолання цих проблем вимагає подальших наукових досліджень, інженерних розробок, а також активної державної підтримки і міжнародної кооперації [22].

1.4. Заходи щодо оптимізації нагромадження біомаси мікроводоростей як базового субстрату біопалива III покоління

Одним із найважливіших факторів, що впливають на ріст мікроводоростей, є параметри культивування: температура, освітлення, рН середовища, доступність макро- і мікроелементів, джерела вуглецю та азоту. Наприклад, оптимальна температура для більшості прісноводних мікроводоростей становить 20–30 °C, тоді як морські штами можуть культивуватись при дещо вищих температурах. Надмірне підвищення температури призводить до денатурації ферментів та зниження фотосинтетичної активності [23].

Освітлення також має вирішальне значення – як інтенсивність, так і спектральний склад світла. У штучному культивуванні використовуються світлодіоди з регульованим спектром (наприклад, червоний та синій спектри), які стимулюють фотосинтез та біомасоутворення. Умови світло-темрявого циклу (наприклад, 16:8 або 12:12) і фотоперіодичність також мають оптимізуватись для конкретного штаму.

Щодо рН, більшість мікроводоростей росте в межах 6.5–8.5, однак деякі види (наприклад, *Chlorella vulgaris*) здатні переносити більш кислі або лужні значення. Додаткове насичення середовища CO₂ (до 1–5%) значно посилює ріст і сприяє накопиченню ліпідів.

Мікроводорості можуть рости як у фототрофному, так і в міксотрофному або гетеротрофному режимах. Фототрофне культивування – найбільш розповсюджене, але характеризується нижчою продуктивністю, особливо в умовах недостатнього освітлення. Міксотрофний підхід дозволяє поєднувати фотосинтез і використання органічних субстратів (наприклад, глюкози, ацетату), що значно підвищує врожайність біомаси [24].

Гетеротрофне культивування, хоча і забезпечує найвищі темпи росту та накопичення ліпідів, потребує стерильних умов і значних витрат на джерела вуглецю, що ускладнює масштабування. Однак новітні підходи

включають використання недорогих органічних субстратів, таких як стічні води або харчові відходи, що робить процес більш економічно доцільним.

Генетична оптимізація штамів мікроводоростей – один із найперспективніших шляхів підвищення їх продуктивності. Застосування методів генної інженерії дозволяє: підвищити ефективність фотосинтезу; інтенсифікувати синтез ліпідів шляхом модифікації метаболічних шляхів; підвищити стійкість до стресових факторів (осмотичний тиск, температура, рН); зменшити утворення небажаних побічних метаболітів [25].

Окрім генної інженерії, активно застосовується направлений мутагенез і селекція високопродуктивних штамів з використанням ультрафіолетового опромінення, хімічних мутагенів, адаптації до екстремальних умов тощо.

Промислові установки для культивування мікроводоростей поділяють на відкриті (наприклад, ставкові системи) та закриті (фотобіореактори). Хоча відкриті системи є дешевшими, вони менш контрольовані й схильні до забруднення. Фотобіореактори – це герметичні системи, які дозволяють точно регулювати параметри середовища, забезпечують вищу продуктивність і якість біомаси.

Оптимізація дизайну біореактора, швидкості перемішування, газообміну та освітлення дає змогу уникати "тіньового ефекту", зменшити фотолімітацію, покращити масообмін та гомогенність культури [26].

Одним із ефективних способів підвищити вихід ліпідів – штучне індукування стресу у мікроводоростей (наприклад, азотне голодування, солевий стрес, температурні коливання). У таких умовах клітини "перемикаються" з активного росту на збереження енергії, що стимулює накопичення тригліцеридів – основної сировини для виробництва біодизеля.

Однак важливо дотримуватися балансу між ростом біомаси та накопиченням ліпідів, оскільки надмірний стрес може призвести до пригнічення всієї культури.

Важливим аспектом є вдосконалення технологічного обладнання, зокрема фотобіореакторів різного типу – від закритих систем з контролем параметрів до інтегрованих з сонячними панелями або тепловими установками. Ці інновації не лише підвищують продуктивність, але й знижують енергетичні витрати на культивування, що є критично важливим для комерціалізації. Застосування «розумних» систем управління, зокрема на базі штучного інтелекту та інтернету речей, дає змогу оптимізувати живлення, освітлення, температуру і інші умови в режимі реального часу, підвищуючи стабільність та ефективність процесів [27].

1.5. Вітчизняні та зарубіжні приклади реалізованих проектів щодо отримання біопалива III покоління

Успішна реалізація проектів з культивування мікроводоростей для отримання біопалива III покоління підтверджує їхню практичну цінність і комерційний потенціал. У всьому світі відбувається активне впровадження інноваційних технологій, які дозволяють підвищити ефективність вирощування, зменшити витрати та оптимізувати процеси отримання біомаси. Нижче наведено кілька ключових прикладів реалізованих проектів, які демонструють досягнення в цій сфері [28-30].

Компанія *Sapphire Energy* стала однією з перших, хто розпочав масштабне виробництво «зеленої нафти» з мікроводоростей. Їхній пілотний завод у штаті Нью-Мексико, що отримав понад 100 млн доларів фінансування від уряду США, мав на меті виробництво до 100 барелів водоростяної нафти на добу. Для культивування використовували відкриті фотобіореактори – великі мілкі водойми. Хоча проєкт був зупинений через фінансові труднощі, він став каталізатором для розвитку подібних ініціатив у США.

Algenol застосувала власну запатентовану технологію, яка дозволяє мікроводоростям виробляти етанол безпосередньо в процесі фотосинтезу. Компанія вирощує водорості у закритих фотобіореакторах з морською водою, що забезпечує високий рівень контролю та мінімізує ризики забруднення. Один з пілотних об'єктів у Флориді продемонстрував потенціал виробництва понад 30 000 галонів етанолу на акр щорічно [31].

Іспанська компанія *BioFuel Systems* (BFS) розробила унікальну систему для перетворення CO₂ з промислових викидів у нафтові компоненти за допомогою мікроводоростей. Проєкт у місті Аліканте поєднав очищення атмосфери від парникових газів із виробництвом відновлюваного пального. Їхня технологія базується на замкнутому циклі – використовується вуглекислий газ з електростанцій, вода, світло та спеціально виведені штами водоростей [32].

Китай активно інвестує у мікроводорості як джерело біопалива. Компанія *Yantai Hairong Microalgae Bioenergy* реалізувала кілька промислових установок на базі відкритих ставків і трубчастих фотобіореакторів. Основна мета – забезпечити стале джерело енергії для транспортного сектору та зменшити залежність від імпорту нафти. Значну увагу також приділено використанню стічних вод як поживного середовища, що дозволяє зменшити витрати на культивування.

Індія запустила низку ініціатив у рамках національної стратегії біоенергетики. Інститут *Indian Institute of Technology (IIT) Kharagpur* працює над розробкою ефективних методів культивування *Chlorella vulgaris* для отримання біодизеля. У деяких регіонах Індії також реалізовано демонстраційні установки для переробки стічних вод з одночасним отриманням енергії [33].

Biofat — європейський пілотний проект, реалізований у межах FP7 (Сьома рамкова програма ЄС з досліджень). У ньому брали участь наукові установи та компанії з Італії, Португалії та Іспанії. Метою було об'єднати всі етапи виробництва – від вирощування водоростей до вилучення ліпідів і переробки в біодизель. Завод у Португалії довів життєздатність технології на великому масштабі.

В Україні технології мікроводоростей переважно досліджуються на рівні наукових установ – Інституту мікробіології та вірусології НАН України, Інституту агроекології. Проведено пілотні дослідження з культивування *Chlorella* на стічних водах з подальшим одержанням біомаси для виробництва біогазу або біодизеля. Через економічні обмеження широкомасштабна реалізація поки що стримується, однак науковий потенціал залишається високим [35].

Усі наведені приклади свідчать про те, що мікроводорості можуть стати основою нової енергетичної парадигми. Незважаючи на складнощі з комерціалізацією, реалізовані проекти демонструють прогрес у зниженні витрат, підвищенні продуктивності біомаси та ефективності перетворення її в

енергоносії. Вони також сприяють розвитку технологій очищення повітря та вод, що посилює їхню екологічну цінність.

Хоча мікроводорості мають величезний потенціал як джерело біопалива третього покоління, їхнє широкомасштабне впровадження стикається з низкою суттєвих проблем і викликів, які обмежують ефективність і економічну доцільність технологій культивування та переробки. Розглянемо основні проблеми детальніше [36].

Одним із головних обмежень є значні інвестиції у створення промислових установок з культивування мікроводоростей, особливо у закритих фотобіореакторах. Ці системи потребують високотехнологічного обладнання, складних систем контролю параметрів середовища (температури, освітлення, газообміну), що суттєво збільшує початкові капітальні витрати. Через це економічна віддача може бути низькою, особливо для невеликих виробництв.

Культивування мікроводоростей пов'язане з великими витратами на енергоресурси: освітлення (особливо в закритих системах), перемішування, контроль температури, підготовку поживних середовищ. Окрім цього, потрібні витрати на підтримку стерильності та захист від забруднень, що додає до операційних витрат.

Для оптимального росту мікроводоростей потрібні стабільні умови – світло певної інтенсивності і спектра, температура, концентрація CO₂, pH середовища. Забезпечення цих умов на масштабах промислового виробництва є складним завданням. Коливання параметрів призводять до падіння продуктивності та якості біомаси [37].

Відкриті системи культивування особливо вразливі до зараження паразитами, бактеріями, грибками та іншими мікроорганізмами, які конкурують з водоростями за поживні речовини або виділяють токсини. Це знижує ефективність і може спричинити повну загибель культури.

У більшості систем культивування біомаса водоростей має низьку концентрацію (0.5-2 г/л), що ускладнює і здорожує процеси збору і

подальшої обробки, такі як осадження, фільтрація або центрифугування. Це викликає потребу у розробці більш ефективних методів збирання.

Не всі штами мікробіодоростей однаково підходять для виробництва біопалива. Потрібен пошук і селекція штамів із високою швидкістю росту, великим вмістом ліпідів або інших цінних компонентів, стійкістю до змін умов культивування та забруднень. Розробка таких штамів є тривалим і дорогим процесом [38].

Конвертація біомаси у біопаливо (біодизель, біогаз, етанол тощо) потребує додаткових технологічних етапів — екстракції ліпідів, ферментації, очищення, що збільшує загальні витрати і складність процесу. Існує також проблема з масштабуванням лабораторних технологій до промислових масштабів без втрати ефективності.

Хоча використання мікробіодоростей має екологічні переваги, існують нормативні обмеження на застосування деяких штамів, особливо трансгенних. Крім того, масштабне виробництво може потребувати значних ресурсів – води, добрив – що викликає занепокоєння щодо сталого розвитку.

Біопаливо з мікробіодоростей поки що не може конкурувати за собівартістю з традиційними викопними видами палива або іншими видами біопалива першого і другого покоління. Відсутність стабільного ринку, а також коливання цін на нафту впливають на інвестиційну привабливість.

Перехід від пілотних і демонстраційних проєктів до промислового виробництва стикається з проблемами масштабування, стандартизації та доведення економічної ефективності. Необхідні інновації у технологіях культивування, збирання і переробки, а також розробка сприятливих політик підтримки.

Для успішного впровадження біопалива на основі мікробіодоростей потрібно подолати комплекс технічних, економічних та екологічних бар'єрів. Розв'язання цих проблем вимагає мультидисциплінарного підходу — від біології і біотехнології до інженерії і економіки, а також активної підтримки з боку держави і бізнесу. Інвестиції в наукові дослідження та пілотні проєкти

сприятимуть поступовому подоланню цих викликів і забезпечать стале майбутнє для біопалива третього покоління [29].

Враховуючи поточні виклики та глобальні тренди, можна виокремити кілька ключових напрямів, що визначатимуть майбутнє цієї галузі. Одним із головних інноваційних напрямів є створення штамів мікроводоростей з підвищеною продуктивністю біомаси та збільшеним вмістом цінних компонентів – ліпідів, білків, вуглеводів. Використання методів генної інженерії, селекції та синтетичної біології дає змогу модифікувати метаболічні шляхи, підвищуючи швидкість росту та продуктивність ліпідів, які є основою для біодизелю.

Застосування біоінформатичних інструментів для аналізу геномів та транскриптомів мікроводоростей допомагає розкрити складні взаємодії в клітині, що впливають на продуктивність. Системний підхід дозволяє оптимізувати процеси культивування і зменшувати витрати ресурсів.

Розробка та впровадження нових типів фотобіореакторів – наприклад, з використанням наноматеріалів для покращення світлопоглинання, інтеграція з системами сонячної енергетики, використання вертикальних фермерських установок та біофабрик – значно підвищать ефективність і масштабованість виробництва [30].

Автоматизація та інтелектуальні системи контролю, які базуються на штучному інтелекті та інтернеті речей (IoT), забезпечать оптимальний режим роботи, мінімізуючи людський фактор і втрати.

Важливим напрямом є розвиток концепції біорефінерії, коли біомаса мікроводоростей не лише слугує сировиною для біопалива, а й джерелом харчових добавок, кормів, фармацевтичних і косметичних компонентів. Такий комплексний підхід підвищує економічну доцільність та екологічність процесів.

Використання відпрацьованих вуглецевих газів (наприклад, з теплових електростанцій), поживних речовин із стічних вод і промислових відходів у якості живильного середовища для мікроводоростей відкриває

перспективи зниження собівартості виробництва та одночасного вирішення проблеми забруднення.

Інновації у сфері методів концентрування і збору біомаси – ультрафільтрація, флокуляція за допомогою екологічно безпечних реагентів, мембранні технології – допоможуть зменшити енергозатрати та підвищити якість сировини для подальшої переробки.

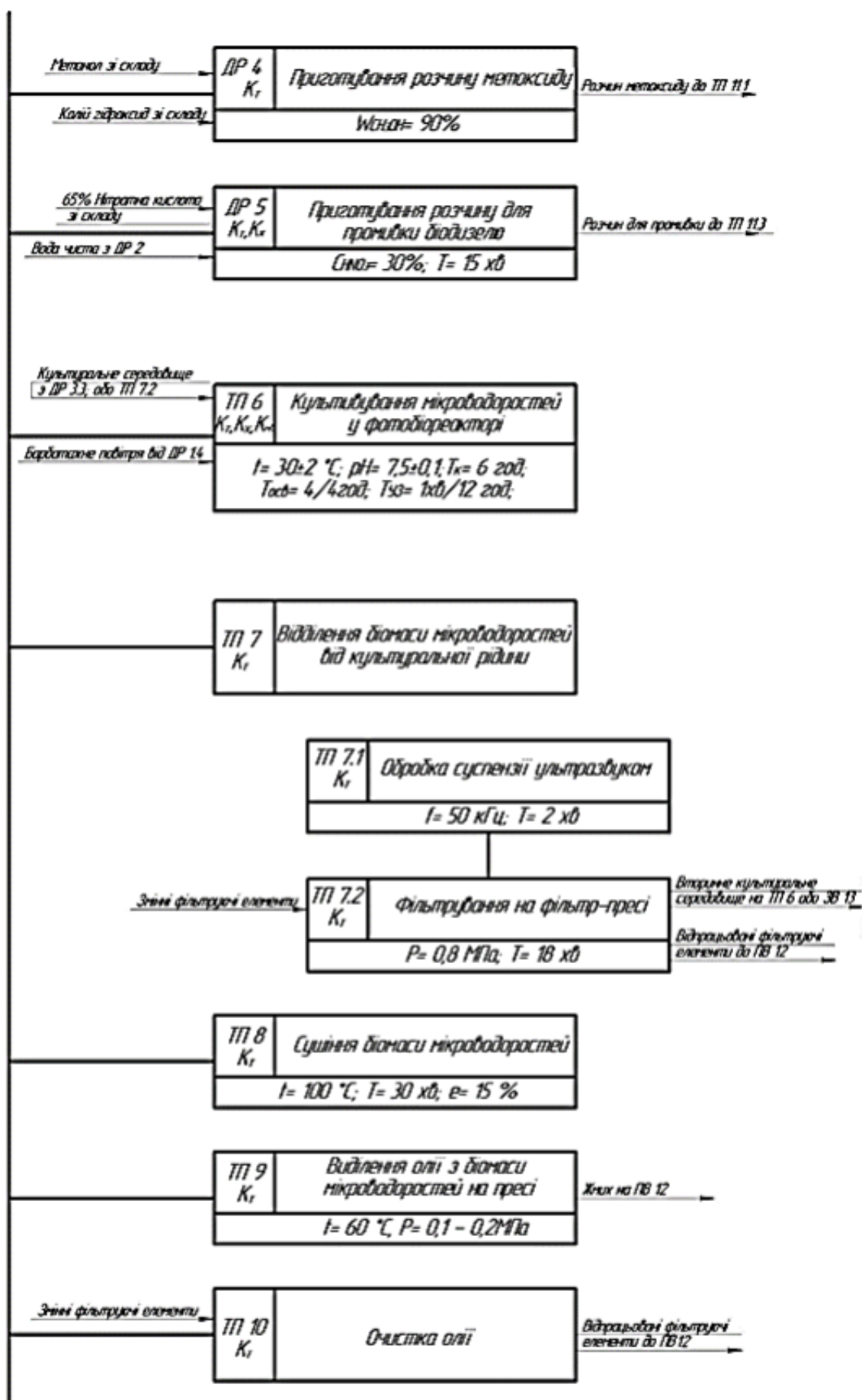
Також активний розвиток хімічних і біохімічних методів екстракції біоактивних речовин сприятиме створенню більш ефективних технологічних ланцюгів.

Акцент на екологічну безпеку та стійкість виробництва сприятиме використанню біорозкладних матеріалів, відновлювальних ресурсів і зменшенню викидів парникових газів упродовж усього життєвого циклу біопалива з мікроводоростей.

Перспективи розвитку інноваційних підходів до культивування мікроводоростей є надзвичайно широкими і багатоаспектними. Вони охоплюють як фундаментальні наукові дослідження, так і інженерні розробки, інтеграцію новітніх технологій, розробку ефективних економічних моделей і впровадження екологічно сталих практик. Саме поєднання цих факторів дасть змогу подолати існуючі проблеми, значно підвищити ефективність виробництва біопалива третього покоління та створити основу для сталого розвитку енергетики майбутнього [40].

2.1. Опис технологічної схеми та процесу одержання біодизелю з мікроводоростей





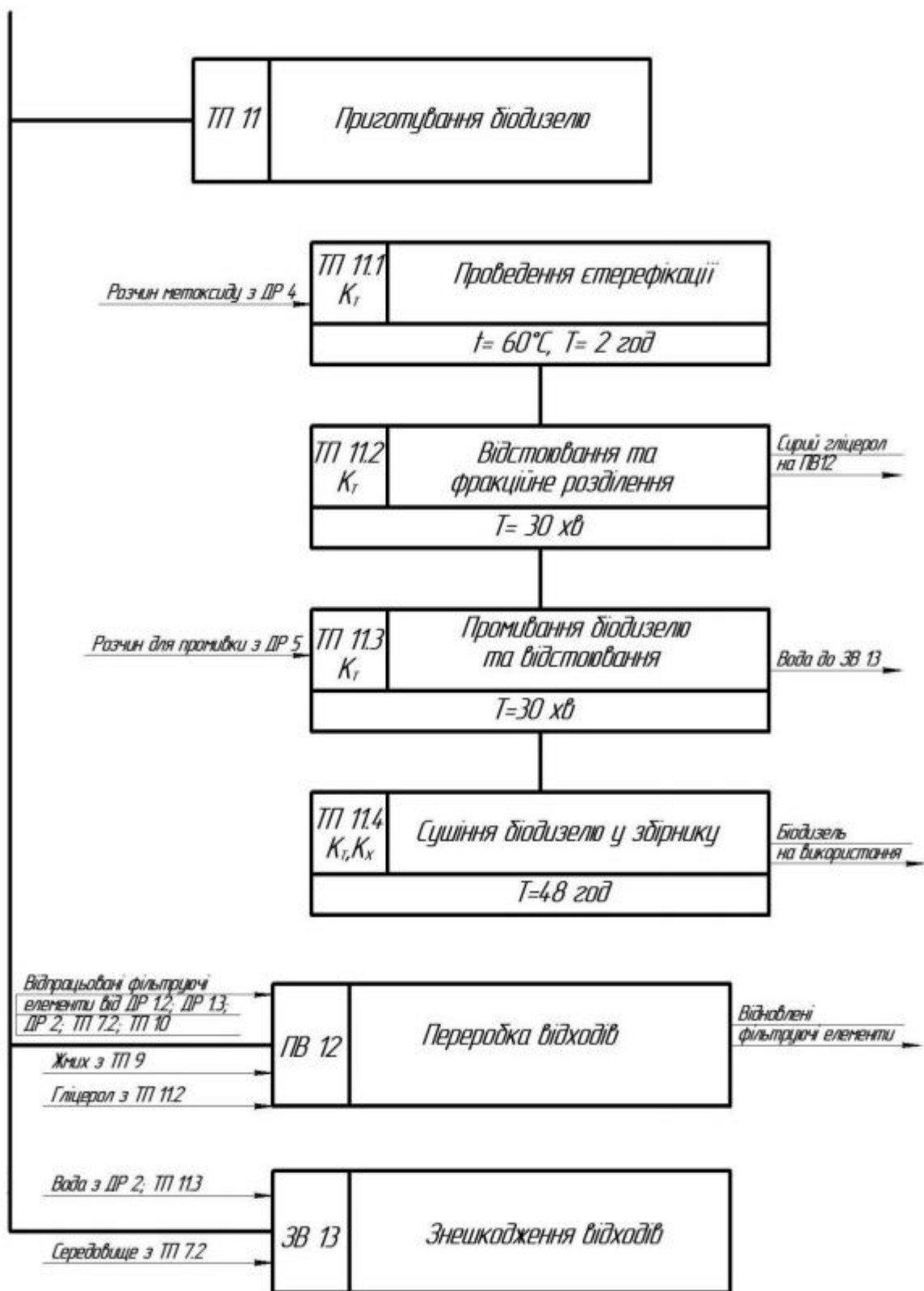


Рис.2.1. Регламентна технологічна схема одержання біопалива III покоління (біодизелю) із використанням біомаси мікроводоростей [40].

Таблиця 2.1.

Опис основних ланок технологічного процесу виробництва біодизелю із
мікроводоростей

ДР 1 Підготовка виробництва. Проводиться для охорони здоров'я персоналу, створення безпечних умов праці та для забезпечення високої якості продукції.

ДР 1.1 Підготовка повітря для вентиляції. Очистка повітря здійснюється в три ступені. Використовуються фільтри грубої та тонкої очистки. Фільтри стерилізують гострою парою за 125-135°C один раз на місяць. Відпрацьовані фільтри замінюють на нові.

ДР 1.1.1 Забір повітря. Повітря забирають з атмосфери через забірну шахту висотою 20-30м. Повітря забирається за рахунок низького тиску, створеного вентилятором В-3.

ДР 1.1.2 Попередня очистка повітря. Здійснюється за допомогою фільтра Ф2 - типу ФВП-I з набивкою з поліестеру. Розмір часток що затримується >10 мкм. Ефективність очистки 80- 90%.

ДР 1.1.3 Кондиціонування. Повітря охолоджується в теплообміннику. Через різке охолодження випадає конденсат, який утилізується.

ДР 1.2 Приготування миючих розчинів. Для мийки використовують розчин каустичної соди. Розчин готують для разового використання. Розраховану кількість порошкоподібної каустичної соди розчиняють водою при температурі 40-50 °C та перемішуванні при 40 об/хв турбінною мішалкою. Після приготування 50% миючого розчину його переміщують у збірник де нагрівають до 70 °C і використовують для обробки виробничих приміщень та для мийки вузлів обладнання.

ДР 1.3 Підготовка комунікацій та обладнання

ДР 1.3.1 Перевірка обладнання на герметичність. Здійснюють водою під надлишковим тиском перед кожним запуском.

ДР 1.3.2 Підготовка обладнання. Здійснюють візуальну перевірку стану та справності обладнання. Мийка обладнання здійснюється гарячим 70-80°C розчином миючого засобу, після чого обладнання ополіскують холодною водою.

ДР 2. Приготування метоксиду. Розчин готується в реакторі Р-11 розрахунку на 1 т біодизельного палива - 111 кг метанолу і 12 кг лугу. Метанол подають у реактор, де він перемішується. До метанолу з дозатора додається КОН. Змішування проводять протягом 15 хв зі швидкістю 40 об/хв до досягнення гомогенного стану розчину.

ДР 4. Приготування розчину для промивання біодизеля. Для промивки біодизеля використовують 10% розчин HNO_3 . Готують методом розведення концентрованої нітратної кислоти. В реактор водопровідну воду, та через об'ємний дозатор подають концентровану HNO_3 , де вони перемішуються турбінною мішалкою впродовж 5 хв зі швидкістю 40 об/хв.

ДР 5. Приготування води для культивування. Водопровідна змішується з солями (NaNO_3 та та 511,6 мг/л KH_2PO_4 до загальної концентрації фосфору у воді концентрації 3.76 мМ) у реакторі при інтенсивному перемішуванні, 300 об/хв яке забезпечується турбінними мішалками. Готове поживне середовище доводять концентрованим розчином NaOH до значення рН 6,8-7,8.

ДР 5.1. Стерилізація поживного середовища Утворення монокультури потребує високих затрат на стерилізацію поживного середовища. Для уникнення цих затрат пропоную вносити 10% якісного посівного матеріалу, вирощеного на стерильному поживному середовищі. Це забезпечить кількісну перевагу цільового виду над іншими, що пройшли крізь фільтри і скоротить лаг-фазу цільового виду. Для забезпечення чистоти культури на стадії підготовки посівного матеріалу, поживне середовище необхідно автоклавувати. Процес стерилізації проводять протягом 25 хвилин, тиск - 0,2 МПа, при температурі - 130°C в автоклаві, куди подається ростове середовище.

ТП 6. Вирощування посівного матеріалу у фотобіореакторі

ТП 6.1. Розморозка музейної культури. Музейну культуру розморожують при 37°C, після чого в асептичних умовах вносять в колбу на 3л. Вирощують в колбі на 3л, в освітленому термостаті при 30°C до оптичної густини 0,3г/л.

ТП 6.2. Напрацювання посівного матеріалу. Підготовлене та простерилізоване поживне середовище з автоклаву насосом перекачується до фотобіореактора і змішується з інокулянтном для подальшого культивування. Культивування проводиться в періодичному режимі. Перемішування здійснюється вуглекислим газом який з балонів через індивідуальний фільтр надходить до фотобіореактора. Подача вуглекислого газу відбувається періодично (протягом 10 хв раз на 4 год) з балонів через інжектор з витратою 60 дм³/год. Для освітлення та підтримання необхідної температури в реакторі використовують світлодіодні лампи, які генерують освітлення з довжинами хвиль в діапазонах 400-450 нм і 650-700 нм з інтенсивністю 130-160 мкмоль/м²/с. Режим освітлення 16 год. світло 8 год./темрява.

ТП 7. Виробниче культивування. Здійснюють у фотобіореакторах Р-27 за тих же умов, що й посівний матеріал. В нестерилізоване середовище вносять 10% від об'єму посівного матеріалу. Культивування проводиться в безперервному режимі, тож необхідно постійно подавати поживне середовище і відводити частину культурального середовища, відпрацьоване повітря та кисень, що утворюється в процесі життєдіяльності мікроорганізмів. Культивування здійснюють в вертикальних трубчатих фотобіореакторах.

ТП 8. Відділення біомаси мікроводоростей від поживного середовища

ТП 8.1 Флотація. Флотатор являє собою прямокутну конструкцію, довжина 3 м, а ширина 2 м. Глибина водного шару в споруді 2 м. культуральна рідина рухається горизонтально зі швидкістю 0,016 м/с. При зниженні тиску з 0,2 МПа в ній виділяється повітря і відбувається процес флотації. Час перебування культуральної рідини у піні становить 40 хвилин. Вода з флотатора збирається і випускається через підвісну стінку. Мікроводорості виносяться в шарі піни, який збирається на поверхні флотаційної камери.

ТП 8.2. Відстоювання Після флотації біомаса за допомогою насоса потрапляє до відстійника, де відстоюється 1 добу для більш повного концентрування.

ТП 9. Екстракція ліпідів з біомаси надкритичним CO₂.

ТП 9.1 Продавлювання мікроводоростей флюїдним CO₂. У реактор подають зріджений CO₂ та, нагріваючись до температури 100°C під дією пари у сорочці апарату, за допомогою радіально поршневого насосу під тиском в 50 МПа подається у надкритичний екстрактор зі швидкістю потоку 0,03 м³/год. У надкритичному екстракторі флюїдний CO₂ продавлюється через касету з завантаженою біомасою. Проводиться контроль обладнання та основних параметрів процесу.

ТП 9.2 Розділення CO₂-екстракту шляхом охолодження. Отриманий внаслідок продавлювання CO₂-екстракт подається у сепаратор, де, під дією води для охолодження в сорочці апарату, за нормальних умов охолоджується до температури 25°C. CO₂-екстракт розділяється на суміш ліпідів і газоподібний CO₂, що накопичується у збирачі. Ліпідна суміш надходить у реактор. Проводиться контроль обладнання та основних параметрів процесу.

ТП 10. Реакція переестерифікації. Переестерифікацію проводять у реакторі при 60°C (нагрівання перегрітим паром) та перемішування 120 об/хв з додаванням метоксиду, як відновника (25 еквівалентів), що подається через об'ємний дозатор. Реакцію проводять протягом години. Після чого дозатором подається H₂SO₄ для нейтралізації надлишку КОН.

ТП 11. Розділення суміші ефіру та гліцерилу у відстійнику. З ректора для переестерифікації насосом суміш ефіру і гліцерину поступає у відстійник. Розділення відбувається протягом 20-60 хв. Суміш ефіру і ліпідів, що не прореагувала поступає в реактор переестерифікації.

ТП 12. Очищення гліцерину з конденсацією метанолу. Гліцерин з відстійника потрапляє у реактор-випарник, де, під дією пари в рубашці, при температурі 80°C з розчину випаровується зайвий метанол. Отримують побічний готовий продукт – очищений гліцерин. Парі метанолу по трубопроводу потрапляють до конденсатора, де конденсуються і рідкий метанол потрапляє до збірника.

ТП 13. Очищення ефіру. Ефір очищають випарюванням спирту в реакторі випарнику при температурі 80°C, що конденсується і збирається у збірник. Отримують непідготовлений біодизель. Проводиться технічний контроль обладнання та хімічний контроль ефіру.

ТП 14. Промивання і нейтралізація біодизеля з видаленням солей. Промивання проходить в промивному реакторі з допомогою 10% розчину нітратної кислоти. При цьому промивання і нейтралізація відбуваються одночасно. Забруднена промивна вода скидається в трубопровід. Проводиться технічний контроль обладнання та хімічний контроль промивання і нейтралізації (рН=7,2).

ТП 15. Сушіння вакуум-випарюванням. У вакуум-випарнику з допомогою гарячої пари проводиться фінальне звільнення біодизеля від води, що може бути сприятливим середовищем для розмноження мікроорганізмів. Отримуємо готовий продукт. Проводиться технічний контроль обладнання.

ЗВ 16. Переробка відходів

ЗВ 16.1. Переробка твердих відходів. Не відпрацьовані фільтри промиваються водою і направляються до стадії ДР 1.1. Відпрацьовані фільтри утилізуються на полігоні загального призначення. Відпрацьовану біомасу компостують на полігоні для компостування.

16.2 Переробка рідких відходів. Рідкі відходи подаються на місцеву очисну споруду.

2.2. Матеріал та методи

З метою культивування *Chlorella vulgaris* в лабораторних умовах як одне із базових культуральних середовищ було використано середовище Заррука, де, в основному, входили компоненти макро- та мікроелементів (табл.2.2).

Таблиця 2.2

Неорганічні елементи живлення середовища Заррука [44].

Середовище	Склад	Кількість, г/л
Заррука	Na HCO ₃	6,8
	K ₂ HPO ₄	0,5
	NaNO ₃	2,5
	K ₂ SO ₄	1,0
	NaCl	1,0
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,2
	CaCl ₂	0,04
	FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,009
	ЕДТА	0,08
	Розчин мікроелементів	1 мл на 1 л середовища

Типові поживні середовища розробляються для культивування фотосинтезуючих організмів, які використовують енергію сонця та вуглекислий газ для одержання органічних речовин. Необхідною умовою для культивування таких мікроорганізмів, в тому числі фотосинтезуючих мікроводоростей є постійне надходження у біореактор вуглекислого газу та видалення кисню.

З цією метою, нами, використовувалась у лабораторних умовах установка, сконструйована на кафедрі (рис.2.2). Суть її зводиться до того, щоб у закритій посудині, де відбувається культивування постійно через аератори надходив вуглекислий газ, підтримувався температурний та світловий режими, а також рівень рН був оптимальним (рис.2.2).

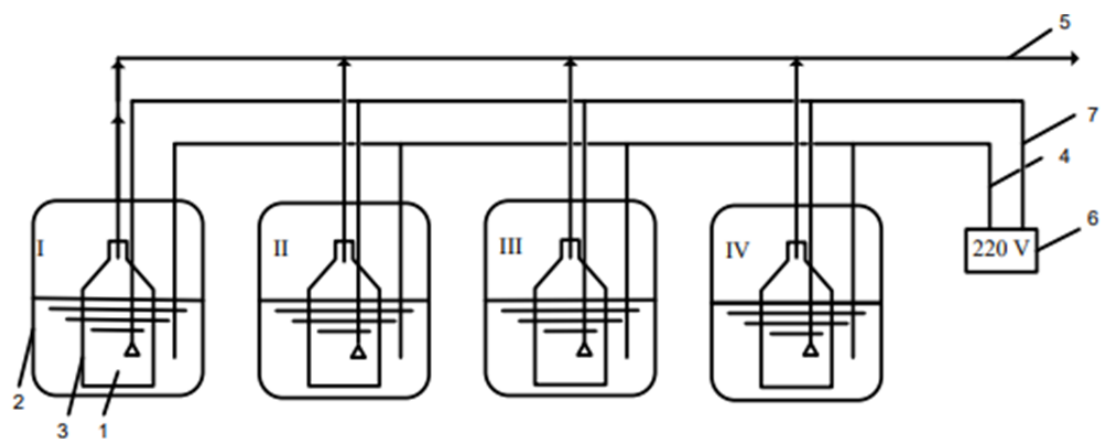


Рис. 2.2. Лабораторна установка вирощування водоростей за умов надходження у фітобіореактор різної концентрації вуглекислого газу та солей . мікро- і макроелементів

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Особливості технологічного процесу одержання біопалива з мікроводоростей

Процеси одержання біопалива з мікроводоростей охоплюють кілька технологічних етапів, кожен з яких має вирішальне значення для кінцевої ефективності, економічної доцільності та екологічної безпеки виробництва. Біопаливо, яке виробляється з мікроводоростей, може бути різних типів, зокрема: біодизель, біоетанол, біогаз, біоводень та синтетичне рідке паливо.

Після завершення фази культивування необхідно зібрати накопичену біомасу. Оскільки культуральне середовище зазвичай має низьку концентрацію мікроводоростей (0,5–2 г/л), процес збору біомаси становить одну з найбільш енергоємних і дорогих частин біоенергетичного циклу.

Основні методи збирання включають: флотацію – використання газових бульбашок для підняття клітин на поверхню; центрифугування – високоефективний, але енергозатратний метод; фільтрацію – застосовується при великих клітинних формах; осадження – природне або за допомогою коагулянтів [41].

Сушіння – обов'язковий етап для подальшої екстракції ліпідів або термохімічної обробки. Залежно від обраного методу сушіння (сонячне, барабанне, розпилювальне, ліофілізація) змінюється рівень енерговитрат та якість продукту. Наприклад, ліофілізація забезпечує найвищу якість, але має високу собівартість.

Ліпіди є основною сировиною для одержання біодизеля. Процес їх екстракції може здійснюватися за допомогою: органічних розчинників (гексан, хлороформ, метанол); суперкритичного CO₂ – екологічно чистий метод, але дорогий; ультразвукової або мікрохвильової обробки – сприяє порушенню клітинних стінок і полегшує видобуток та механічного пресування – менш ефективний, але простий і недорогий метод.

Транспестерефікація ліпідів. Цей процес дозволяє перетворити тригліцериди мікроводоростей у біодизель. Він проходить за участі спирту

(найчастіше метанолу) і каталізатора (лужного або кислотного). Продуктом реакції є метилові ефіри жирних кислот (біодизель) і гліцерол як побічна речовина.

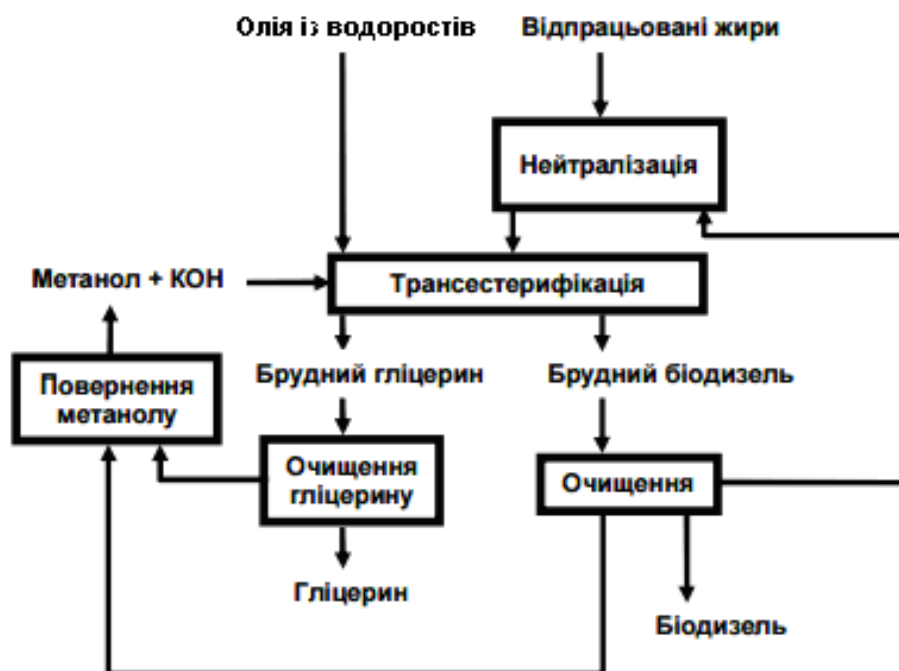


Рис. 3.1. Загальна схема виробництва біодизелю із мікроводоростей

Окрім біодизеля, з мікроводоростей можуть бути отримані й інші типи біопалива: біоетанол – через ферментацію вуглеводів після гідролізу клітинної маси; біогаз – внаслідок анаеробного зброджування залишкової біомаси; біоводень – за умов фотобіологічного метаболізму водоростей (деякі штами здатні продукувати водень під впливом світла); піролізне паливо – при термохімічній переробці сушеної біомаси у високотемпературних умовах.

Для досягнення максимальної ефективності розробляються біорефінерії – інтегровані системи, які дозволяють із тієї самої біомаси отримати кілька продуктів: біопаливо, харчові добавки, фармацевтичні речовини, добрива. Це знижує собівартість і підвищує економічну рентабельність [42].

Хоча лабораторні технології довели ефективність мікроводоростей як джерела палива, масштабування на промисловий рівень залишається

проблематичним через: високі енергетичні витрати на сушіння та екстракцію; складність утримання культур у відкритих або напіввідкритих системах; низьку конкурентоспроможність у порівнянні з викопним паливом за ринковими цінами; нестачу стандартизованих процесів і регуляцій (рис. 3.2).

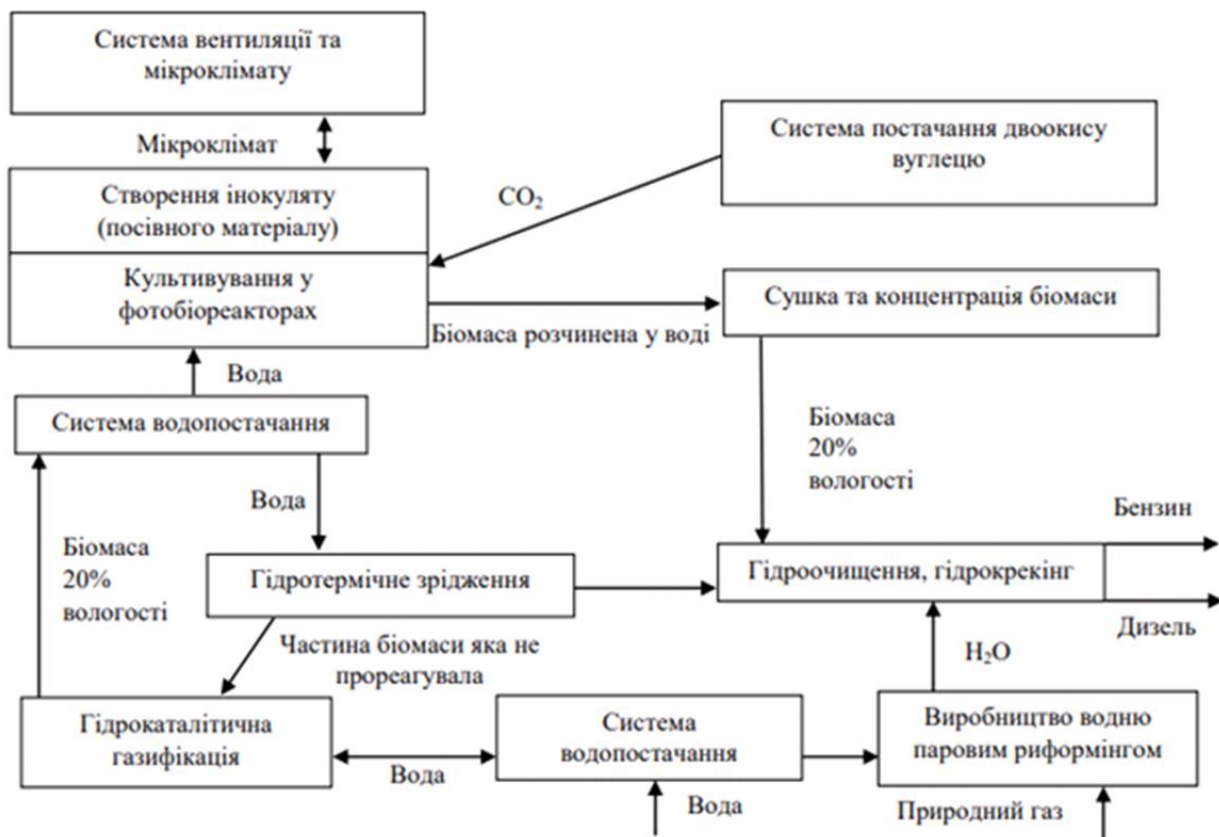


Рис. 3.2. Цикл виробництва біопалива III покоління – біодизелю [43].

Переваги та недоліки використання мікрободоростей як джерела біопалива.

Мікрободорості розглядаються як перспективна сировина для виробництва біопалива третього покоління завдяки їх високій біопродуктивності, здатності до акумулювання ліпідів, широкій екологічній адаптивності та потенціалу для безвідходної переробки. Водночас ця технологія стикається з рядом викликів, що стримують її широкомасштабне впровадження. У цьому розділі докладно розглянемо основні переваги та недоліки використання мікрободоростей у біоенергетиці.

Переваги використання мікрободоростей:

- висока продуктивність біомаси: Мікроводорості мають значно вищу швидкість росту порівняно з наземними енергетичними культурами. У сприятливих умовах деякі види можуть подвоювати свою біомасу за 24 години, що дозволяє отримувати декілька врожаїв на рік;

- високий вміст ліпідів: Багато видів мікроводоростей здатні акумулювати до 50–70% своєї сухої маси у формі тригліцеридів, які є основною сировиною для виробництва біодизеля;

- можливість культивування на непридатних для сільського господарства землях: На відміну від наземних рослин, мікроводорості можна вирощувати у відкритих водоймах, в морській воді, в фотобіореакторах, навіть у відпрацьованих стічних водах, не конкуруючи за орні землі;

- використання відходів і очищення стічних вод: Мікроводорості можуть засвоювати неорганічні сполуки азоту та фосфору зі стічних вод, здійснюючи біоремедіацію, одночасно продукуючи біомасу для енергетичних потреб;

- фіксація CO₂: У процесі фотосинтезу мікроводорості активно засвоюють вуглекислий газ, що сприяє зниженню рівня парникових газів. Цей аспект особливо важливий у контексті боротьби зі змінами клімату;

- висока біохімічна різноманітність: Мікроводорості містять не тільки ліпіди, але й білки, вуглеводи, пігменти, полімери, які можна використовувати в харчовій, фармацевтичній, косметичній і хімічній промисловості.

Недоліки та обмеження:

- висока вартість виробництва: Незважаючи на потенціал, промислове культивування мікроводоростей і виділення з них біопалива залишається дорогим. Основні витрати припадають на етапи вирощування, збору біомаси, сушіння та екстракції ліпідів;

- необхідність високотехнологічного обладнання: Ефективне культивування потребує фотобіореакторів, систем контролю параметрів

(температури, рН, освітлення), що обумовлює високу капітальну вартість проєктів;

- складність масштабування: Вирощування мікроводоростей у промислових масштабах пов'язане з технічними труднощами – зокрема, з рівномірним освітленням культури, уникненням зараження мікрофлорою, і підтриманням стабільних умов;

- нестабільність вмісту ліпідів: Вміст ліпідів у мікроводоростях може сильно коливатися залежно від виду, стадії росту, умов культивування (стресові умови підвищують вміст жиру, але знижують загальну продуктивність);

- обмежена кількість видів для біопалива: Хоча існують десятки тисяч видів мікроводоростей, лише невелика їх кількість має комерційний потенціал для виробництва біопалива, що звужує генетичну базу для відбору;

- проблеми з переробкою вологих біомас: Мікроводорості мають високий вміст води (>90%), що створює труднощі для транспортування, зберігання та переробки, особливо без попереднього енергомісткого зневоднення.

Потенціал мікроводоростей як джерела біопалива третього покоління є значним і багатообіцяючим. Їх переваги – екологічність, швидке зростання, високий вміст ліпідів, – роблять цю групу організмів ідеальними кандидатами для майбутньої зеленої енергетики. Водночас для комерційної реалізації технологій необхідно подолати низку технічних і економічних бар'єрів, що потребує подальших наукових досліджень, інженерних інновацій та державної підтримки на ранніх етапах впровадження.

3.2. Мікроводорості як альтернативне джерело біопалива

III покоління

У наш час, коли гостро стоїть проблема щодо забезпечення потреб населення та промисловості в енергоносіях, актуальним є пошук альтернативних джерел енергії, зокрема, біопалива III покоління. Базовою сировиною для одержання біопалива III покоління, зокрема, біодизелю є біомаса мікроводоростів.

Таблиця 3.1

Порівняльна характеристика продуктивності олії мікроводоростями та рослинами [34].

Сировина	Вміст олії, (% в біомасі на суху вагу)	Врожайність, олії (л/га/рік)	Земельні угіддя, (м ² /рік/кг)	Продуктивність, (кг /рік)
Соеві боби	18	636	18	562
Рапс	41	974	12	862
Соняшник	40	1070	11	946
Пальмова олія	36	5366	2	4747
Рицинова олія	48	1307	9	1156
Мікроводорості	70	136 900	0,1	121 104

Вони є невибагливі до поживного середовища в процесі культивування, однак мають значні переваги (табл.3.1):

- їх продуктивність щодо кількості олії з 1 га у 15-100 разів перевищує сільськогосподарські олійні культури, а також урожайність пальмової олії;
- ростуть приблизно у 20-40 разів швидше, порівняно із рослинами, клітини практично не містять лігнінових структур, що покращує їх технологічність і економічність процесу;
- є можливість технологічний процес культивування масштабувати з використанням фітобіореакторів, які можуть розміщуватися на неугіддях,

включаючи пустелі, а тому мінімізувати використання сільськогосподарських угідь;

- в процесі культивування використовують значну кількість вуглекислого газу виділяючи кисень, окрім того деякі види мікроводоростей можуть бути продуцентами біологічно активних речовин.

На основі наведених даних, можна стверджувати, що використання мікроводоростей у технологічних процесах одержання біопалива є перспективним напрямом, який необхідно розвивати та впроваджувати, не тільки як пілотні проекти, але й у промислових масштабах.

Мікроводорості не є монолітною біологічною групою, вони представлені широким спектром таксонів. Найбільш вивченими у контексті виробництва біопалива є:

- *Chlorella spp.* – зелені одноклітинні водорості, які активно накопичують ліпіди;
- *Scenedesmus spp.* – представники зелених водоростей із високою швидкістю росту;
- *Nannochloropsis spp.* – морські мікроводорості з високим вмістом жирних кислот;
- *Spirulina spp.* (ціанобактерії) – багаті білками, амінокислотами, пігментами та ліпідами.

Таке розмаїття дозволяє обирати оптимальні штами для специфічних умов вирощування та кінцевих цілей біопереробки.

Більшість мікроводоростей є одноклітинними еукаріотами або прокаріотами (ціанобактерії), що забезпечує спрощений цикл розвитку та легкість у моделюванні процесів культивування. Їхні клітини містять: хлоропласти (у еукаріотичних водоростей), де відбувається фотосинтез; вакуолі – для накопичення осмотичних речовин; клітинну стінку, яка у деяких видів ускладнює вилучення ліпідів, що вимагає механічної чи хімічної деструкції.

Клітинна стінка може бути побудована з целюлози, глікопротеїнів або кремнію (у діатомових водоростей), що впливає на вибір методів переробки біомаси. Однак різні види мікробіодоростей є специфічними щодо вмісту в їх клітинах поживних речовин, а саме білків, жирів та вуглеводів (табл. 3.2), враховуючи їх вміст, можна проводити підбір видів за цільовим призначенням. Для одержання біодизелю найкраще підбирати ті види мікробіодоростей, у яких нагромаджується значна кількість ліпідів.

Таблиця 3.2

Основні класи поживних речовин у наведених видів мікроорганізмів, %

Вид	Білки	Вуглеводи	Жири
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50 – 56	10 – 17	12 – 14
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	–	1.9
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8 – 18	21 – 52	16 – 40
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51 – 58	12 – 17	14 – 22
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Spirogyra</i> sp.	6 – 20	33 – 64	11 – 21
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39 – 61	14 – 18	14 – 20
<i>Prymnesium parvum</i>	28 – 45	25 – 33	22 – 38
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3
<i>Porphyridium cruentum</i>	28 – 39	40 – 57	9 – 14
<i>Spirulina platensis</i>	46 – 63	8 – 14	4 – 9
<i>Spirulina maxima</i>	60 – 71	13 – 16	6 – 7
<i>Synechococcus</i> sp.	63	15	11
<i>Anabaena cylindrica</i>	43 – 56	25 – 30	4 – 7

Попри велику синтетичну продуктивність мікробіодоростей, виробництво біопалива III покоління, поки що є енергозатратним і дорогим. Втім, із літературних даних відомо [39], що є можливість зниження витрат завдяки: використанню CO₂ із ТЕС; очищенню стічних вод; спільному виробництву цінних біопродуктів (пігментів, БАДів, кормів тощо) – концепція біорефінерії. Тому інноваційні підходи до культивування

мікроводоростей є ключем до сталого розвитку біоенергетики та зменшення капіталовкладень у дані технології. Схема одержання біодизелю наведена на рис. 3.3.

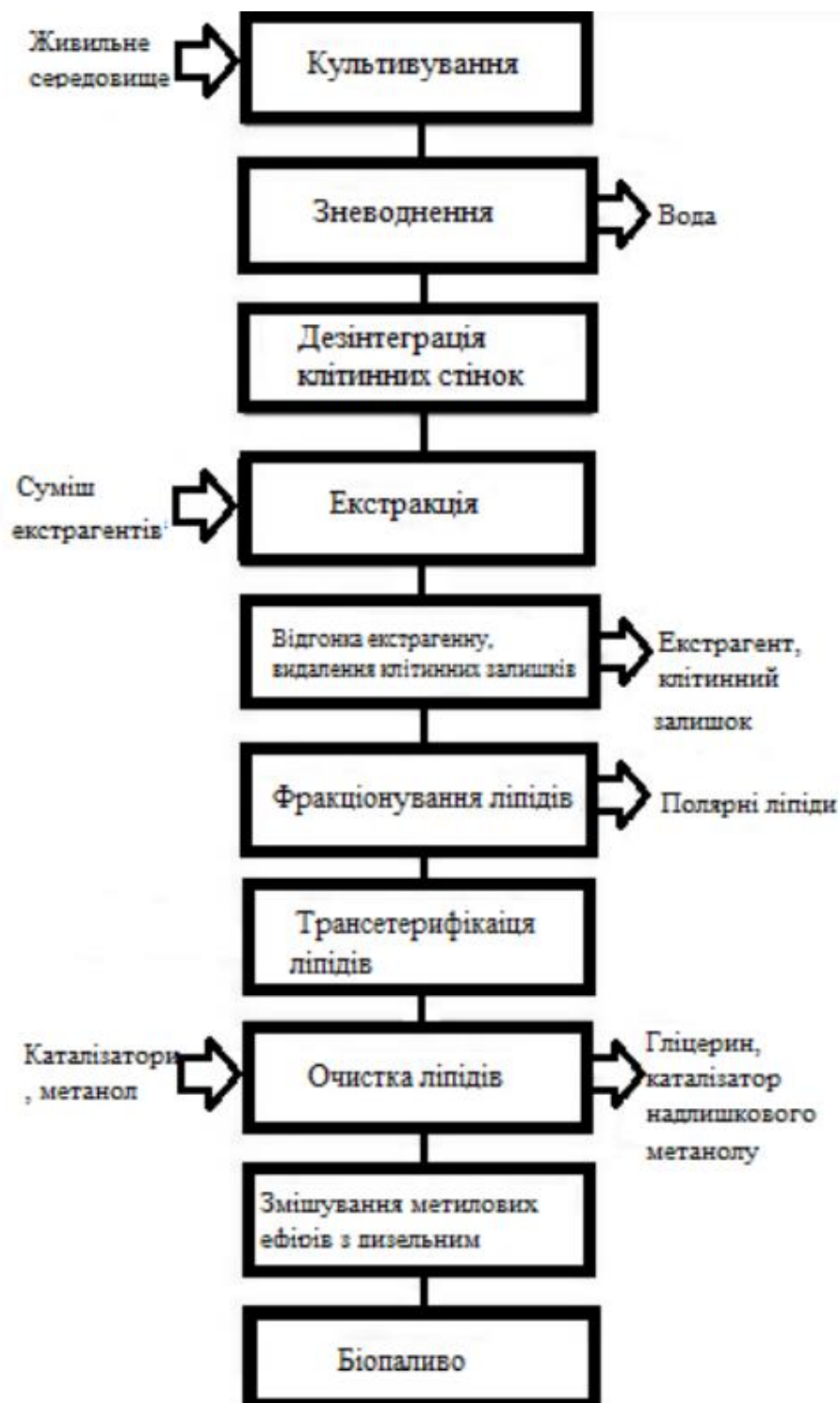


Рис. 3.3. Одержання біодизелю за класичною технологічною схемою з використанням біомаси мікроводоростей.

Культивування популяції мікроводоростей як було зазначено в розділі огляду літератури може відбуватися як у відкритих водоймах, так й реакторах (фотобіореакторах). Культивування мікроводоростей у відкритих водоймах мають значні недоліки, а саме технологічний процес є сезонний, безпосередньо залежить від кліматичних факторів (температури, освітлення, наявності достатньої кількості вуглекислого газу тощо) та стерильних умов.

Культивування у фотобіореакторах виключає зазначені вище недоліки та забезпечує:

- можливість застосування автоматизованих систем управління технологічними процесами;
- максимальна ефективність використання освітлення і, як наслідок, значно більш висока добова продуктивність;
- економія простору, модульне і вертикальне розташування фітобіореактор;
- можливість створення конфігурацій будь-якого розміру;
- зменшення потреби в робочій силі та ліквідація проблем із завантаженням розвантаженням [45].

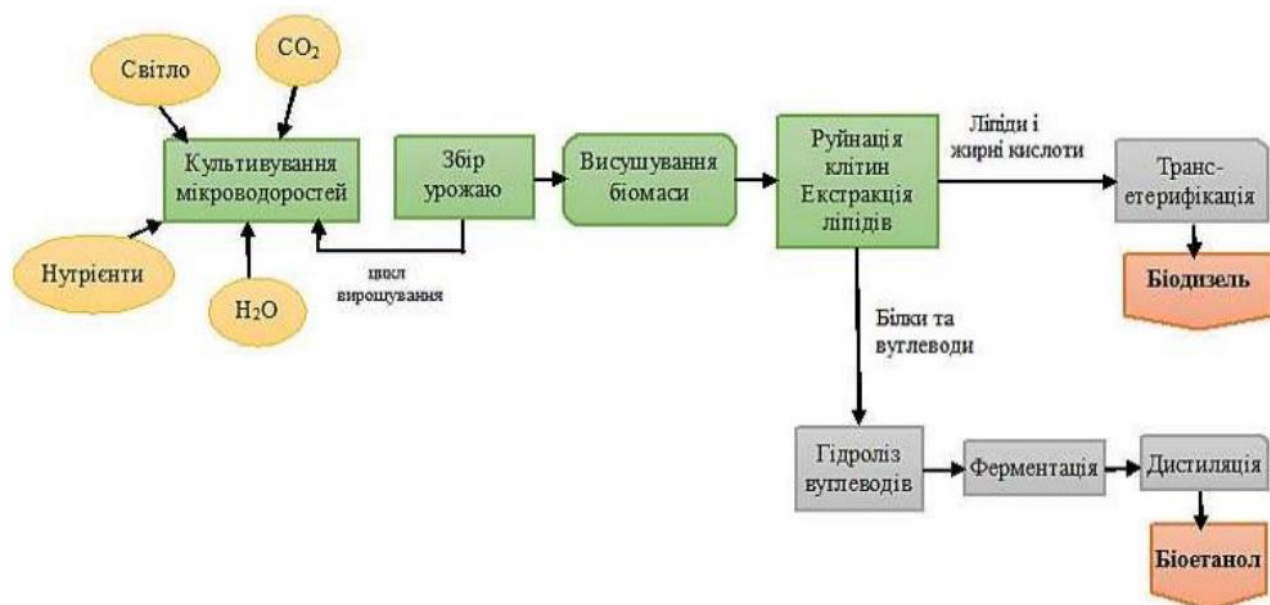


Рис. 3.4. Схема основних ланок технології виробництва біопалива III покоління [31].

Як зазначено на рис.3.4, для культивування мікробіодоростей необхідно забезпечити поживне середовище мікро- і макроелементами, відповідною температурою, освітленням, рН та вуглекислим газом для фотосинтетичних процесів.

Культивування у стерильних фотобіореакторах дає змогу одержати високоякісну олію без сторонніх домішок, побічні біологічно активні речовини, які використовуються в різних галузях економіки від косметичної, фармацевтичної, харчової галузь та живлення тварин. Схема типового біореактора, які на даний час використовуються для вирощування мікробіодоростей наведена на рис. 3.5.

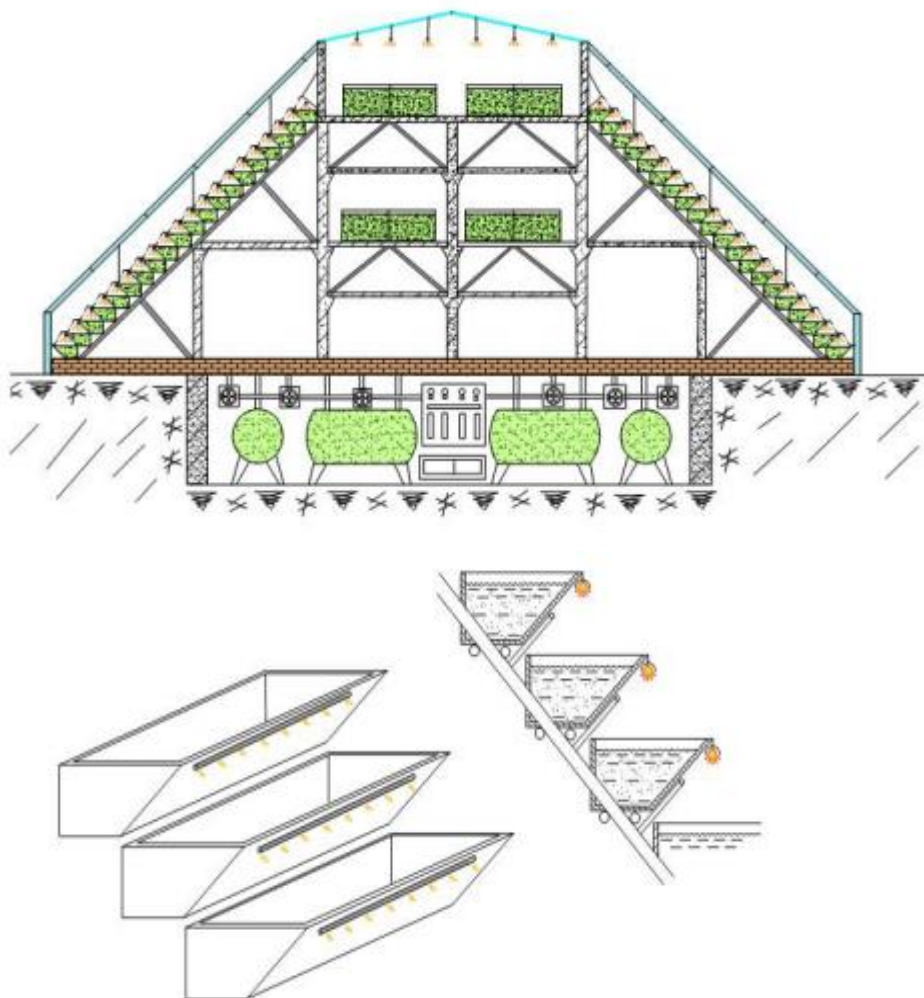


Рис. 3.5. Будова типового фібобіореактора для вирощування мікробіодоростей та ємкості подані в розрізі

Нині, на більшості підприємства, де виробляється біодизель використовують в основному наступні технології циклічна із використанням каталізаторів, циклічна безкаталізаторна та безперервна багатореакторна їх основні характеристики наведені в табл. 3.3, а принцип дії на рис. 3.6-3.7

Таблиця 3.3

Найбільш вживані технології виробництва біодизелю

Назва технології	Характеристика	Переваги	Недоліки
Циклічна із застосуванням каталізаторів	температура реакції близько 65 °С, тиск атмосферний, тривалість реакції від 20 хв. до 2 год., кількість каталізатора – 1,5 % від маси олії, вихід ефіру – близько 85 % від загальної маси біодизеля	• відносна простота технологічного процесу • невисока вартість технологічної лінії • можливість використання сировини невисокої якості	• невисокий вихід ефіру • тривалість реакції
Безкаталізаторна циклічна	температура реакції 30 °С, тиск атмосферний, тривалість реакції 5...10 хв., розчинник – тетрагідрофур, вихід ефіру – близько 98 % від загальної маси біодизеля	• високий вихід ефіру • невисока температура и велика швидкість реакції • чистота продуктів	• потреба в дорогих і агресивних розчинниках • необхідність використання додаткового обладнання
Багатореакторна безперервна	температура реакції 80...160 °С, тиск 2...3 атм, тривалість реакції – від 6...10 хв., кількість каталізатора – до 1 % від маси олії, вихід ефіру – до 98 % від загальної маси біодизеля	• високий вихід ефіру • неперервність процесу • швидкість реакції	• складність технологічного процесу • достатньо висока вартість технологічної лінії • висока чутливість до якості сировини

Впровадження передових технологій, системний підхід до оптимізації виробництва і комплексне використання біомаси сприятимуть тому, що біопаливо третього покоління стане доступним, ефективним і екологічно прийнятним джерелом енергії у найближчі десятиліття.

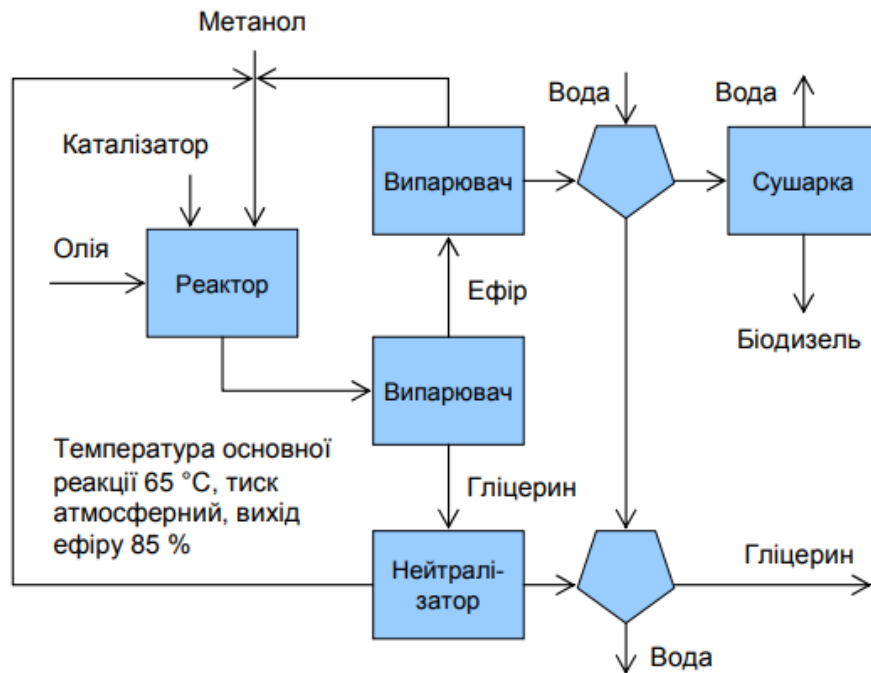


Рис.3.6. Циклічна технологія одержання біодизелю із використанням каталізаторів

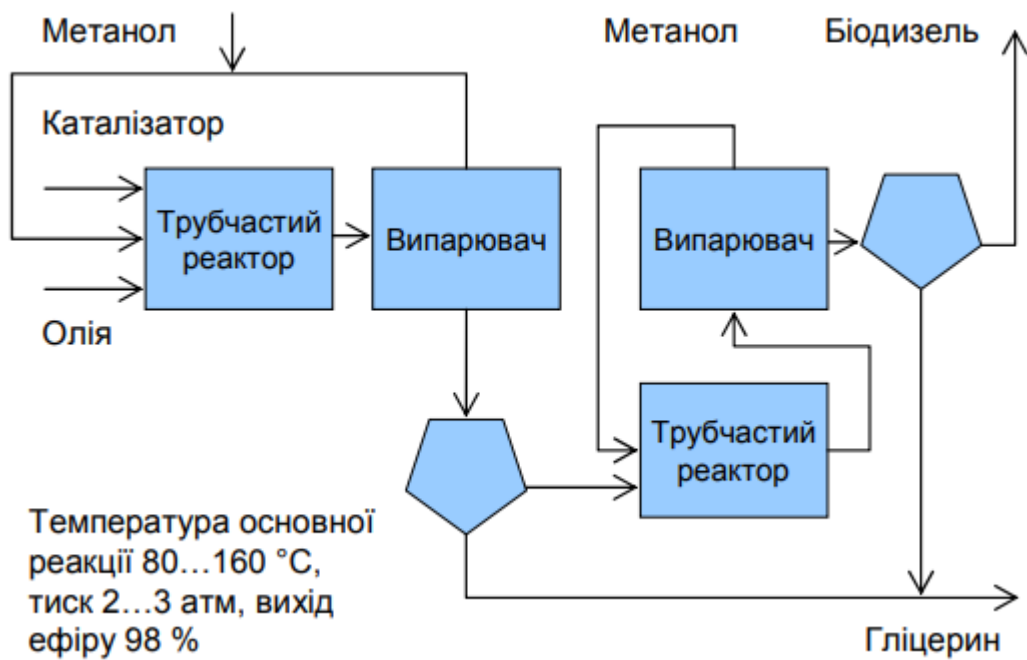


Рис. 3.7. Схема безперервної багатореакторної технології одержання біодизеля

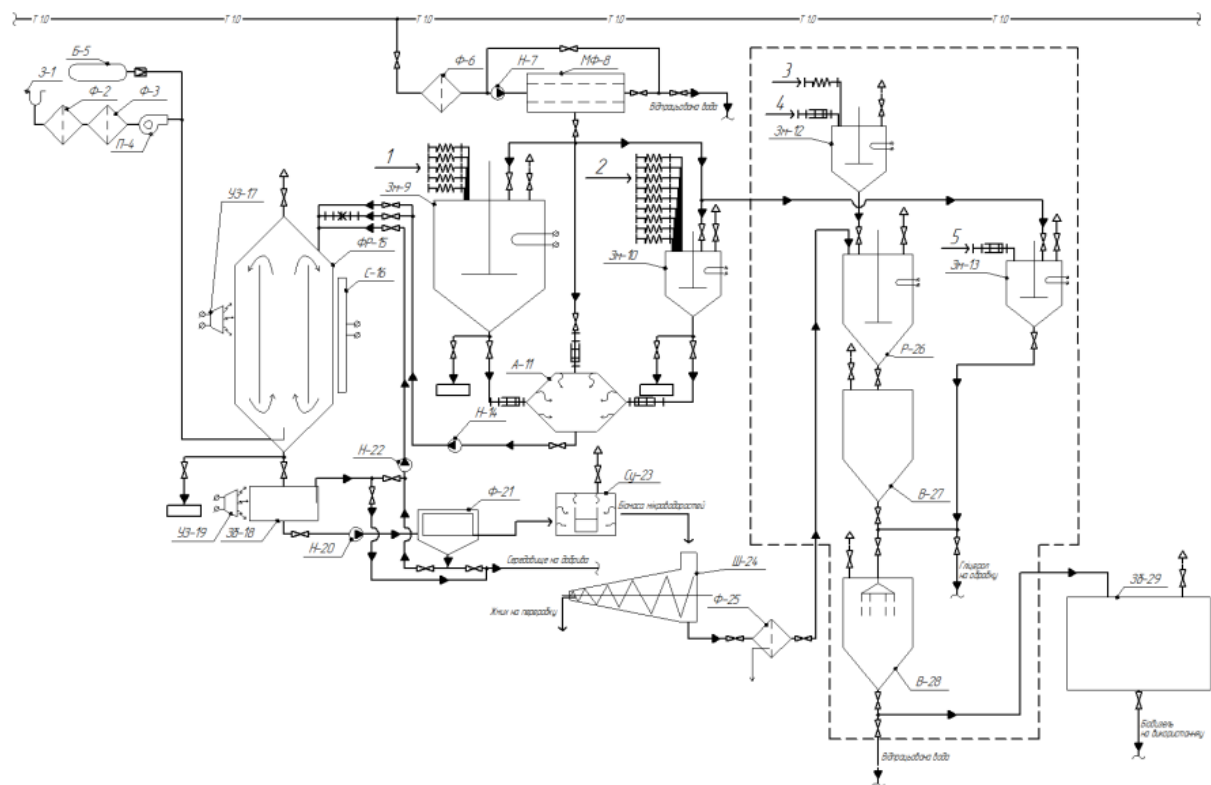


Рис. 3.8. Апаратурне забезпечення технологічного процесу виробництва біопалива III покоління

3.3. Технологічні підходи щодо збільшення нагромадження біомаси мікроводоростей як продуцентів біопалива III покоління

Оптимізація продуктивності біомаси мікроводоростей – це один із ключових напрямів у дослідженнях і промисловому впровадженні технологій виробництва біопалива III покоління. Підвищення врожайності біомаси безпосередньо впливає на економічну ефективність біотехнологічного процесу, знижує собівартість одержання біопалива та забезпечує його сталий вихід у промислових масштабах.

Це є основною стратегією, яка спрямована на інтенсифікацію росту мікроводоростей і накопичення в них цінних метаболітів – насамперед ліпідів, які є сировиною для біодизелю.

Моніторинг та дотримання основних технологічних параметрів вирощування мікроводоростей (світловий та температурний режим, рН, забезпеченість мінеральними поживними речовинами, джерелами Карбону і Нітрогену) дасть змогу максимальну кількість одержати біомаси.

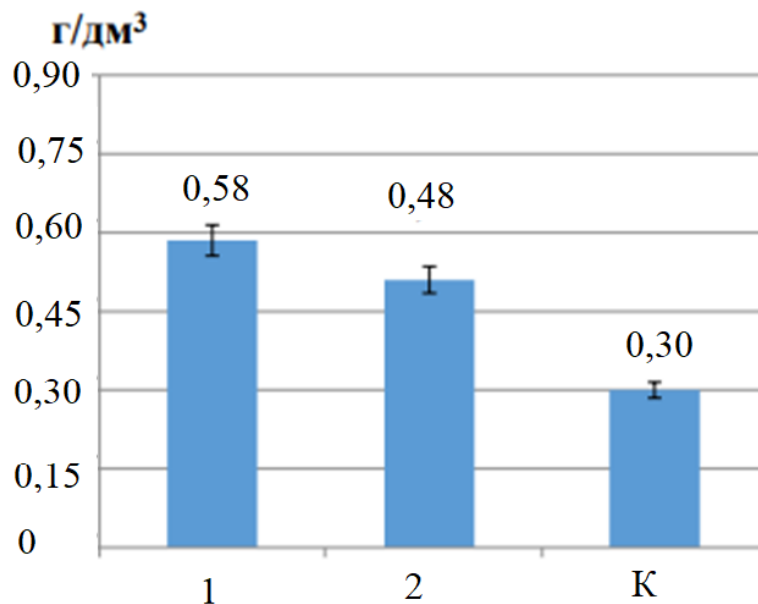


Рис.3.9. Динаміка одержання біомаси *Chlorella vulgaris* на 18 добу культивування залежно від освітлення: 1 – природне + штучне із використанням червоного та синього спектрів; 2 – природне; К – контроль – штучне.

Освітлення фітобіореактора має одне із найбільш важливих значень для нагромадження біомаси мікроводоростей, як одного із основних факторів процесу фотосинтезу. На рис. 3.9, наведено дані щодо динаміки синтезу біомаси мікроводоростей залежно від джерела світла та його спектрів за умов 12:12 годин світлового циклу.

Найбільш активно відбувалась проліферація клітин за умови, коли використовували комбіноване освітлення із використанням червоного та синього спектрів, при цьому кількість біомаси на 18 добу експерименту складала 0,58 г/дм³, що на 48,3% переважав контроль. За використанням у технологічному процесі тільки природного світла, за цей самий час експерименту, приріст популяції мікроорганізмів був рівним 0,48 г/дм³, що на 17,3% був меншим за аналогічні показники 1 зразка, однак перевищував контроль на 31,5%.

Важливе значення для оптимізації проліферації клітин мікроводоростей та нагромадження їх біомаси, а також вмісту ліпідів як субстрату для виробництва біодизелю має збалансоване поживне середовище культивування за основними елементами живлення.

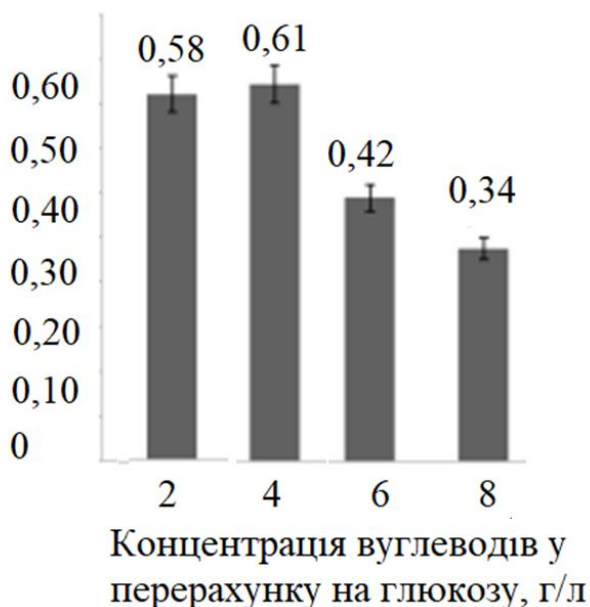


Рис. 3.10. Приріст біомаси популяції мікроводоростей залежно від вмісту вуглеводів як джерела Карбону у культуральному середовищі, г/дм³

На рис.3.10, наведена динаміка утворення біомаси мікробіодоростей залежно від концентрації вуглеводів у поживному середовищі, де проводили культивування. Як видно із наведеного вище рисунку, концентрація вуглеводів (меляси) в перерахунку на глюкозу в концентрації 4 г/л сприяло найбільшому нагромадженню біомаси мікроорганізмів. За такої концентрації вуглеводів у поживному середовищі культивування впродовж 18 діб вихід біомаси мікробіодоростей складав 0.61 г/дм³, і був вищим порівняно зі зразками 1 (концентрація вуглеводів 2 г/л), 3 (концентрація вуглеводів 6 г/л) і 4 (концентрація вуглеводів 8 г/л) відповідно на 5,0; 31,2 та 44,3%.

Однак, для того, щоб можна було б запропонувати найбільш оптимальну концентрацію вуглеводів (меляси) в перерахунку на глюкозу як джерело Карбону для культивування мікробіодоростей, нами, було визначено вміст ліпідів у біомасі, отриманої за різних концентрацій вуглеводів у поживному середовищі (рис.3.11).

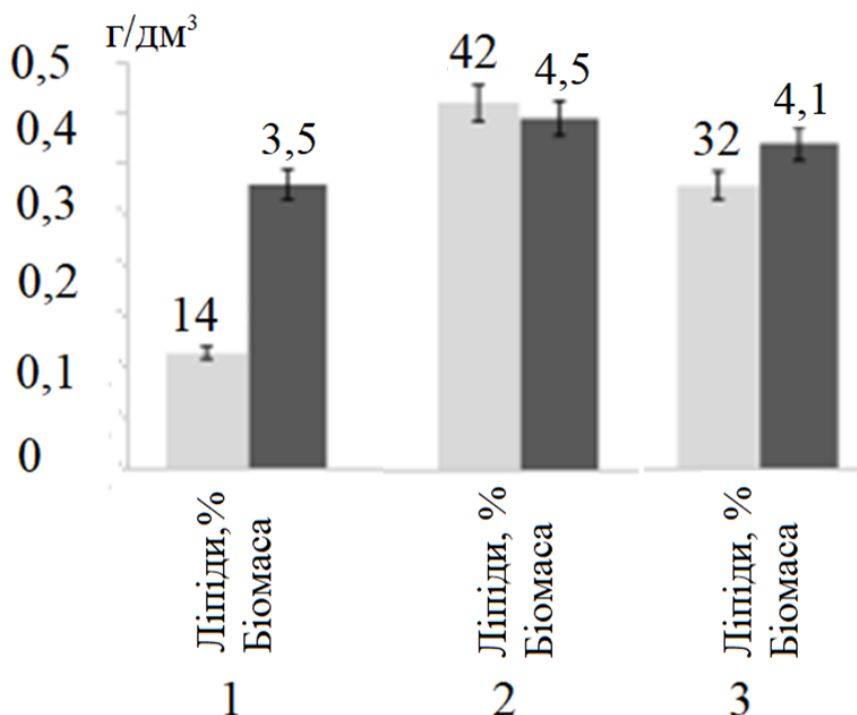


Рис. 3.11. Динаміка росту біомаси (г/дм³) та ліпідних компонентів (%) мікробіодоростей залежно від вмісту вуглеводів як джерела Карбону у поживному середовищі культивування: 1 – 2 г/л; 2 – 4 г/л; 3 – 6 г/л.

Найвищим вмістом ліпідних фракцій як основного субстрату для одержання біодизелю, характеризувався дослідний зразок №2, із вмістом ліпідів 42% від вмісту сухої речовини біомаси, де у поживному середовищі використовували 4 г/л вуглеводного компоненту в перерахунок на глюкозу. За використанням у культуральному середовищі вуглеводного компоненту в дозі 2 та 6 г/л вміст ліпідних фракцій складав відповідно 14 та 32% від сухої біомаси мікробіодоростей, що відповідно на 28 та 10% менше порівняно із зразком №2.

Враховуючи отримані експериментальні дані в лабораторних умовах, рахуємо, що є доцільним у поживне середовище вносити 4 г/л вуглеводного компоненту – меляси в перерахунку на глюкозу, яке забезпечить зростання ліпідних фракцій в отриманій біомасі.

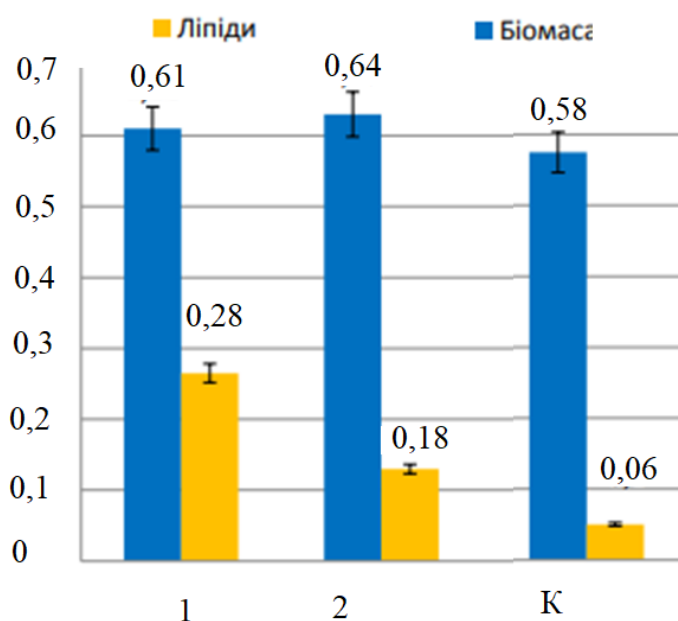


Рис. 3.12. Приріст біомаси мікробіодоростей та вміст ліпідів від джерела Нітрогену: 1 – NH₄Cl; 2 – CO(NH₂)₂ у дозі 2,0 г/л; К – середовище Заррука на 18 добу культивування, г/дм³

Окрім вуглеводного живлення мікроорганізмів, які використовують вуглеводи як джерело Карбону, важливою умовою в процесі культивування мікробіодоростей є підбір джерел Нітрогену (рис. 3.12). Як видно із

наведеного рисунку, внесення в поживне середовище культивування мікроводоростей хлориду амонію, сечовини в дозі 2,0 г/л до середовища Заррука по-різному впливали на приріст вмісту ліпідів у біомасі водоростей.

Під впливом різних джерел Нітрогену приріст загальної біомаси водоростей були майже на одному рівні, в межах статистичної похибки. Однак, внесення додаткової кількості Нітрогену до середовища Заррука суттєво вплинуло на приріст ліпідних компонентів.

Так, за використанням хлориду амоніаку приріст кількості ліпідів був найвищим і дорівнював $0,28 \text{ г/дм}^3$, що відповідало 45,8% від загальної сухої маси мікроводоростей. У процесі використання сечовини у зазначеній дозі – приріст ліпідів дорівнював $0,18 \text{ г/дм}^3$, що відповідало 28,1%. А без додаткового внесення джерел Нітрогену – культивування проходило виключно на середовищі Заррука приріст ліпідів був мінімальний – $0,06 \text{ г/дм}^3$, що відповідало 10,3% від загальної кількості біомаси водоростей.

Враховуючи отримані експериментальні результати досліджень, можна вважати за доцільним нормувати поживні середовища для культивування мікроводоростей також за джерелами Нітрогену, зокрема вносити 2,0 г/л хлориду амоніаку, який сприяє біосинтезу найбільшої частки ліпідів у біомасі мікроводоростей.

Перспективи розвитку технологій культивування мікроводоростей як джерела біопалива III покоління тісно пов'язані з науково-технічним прогресом, інноваційними підходами у біотехнології, матеріалознавстві, автоматизації та системах керування процесами.



Рис. 3.13. Елементи безвідходного одержання біопалива III покоління

Важливим напрямком одержання біопалива III покоління, тобто одержання енергоресурсів із використанням як базового субстрату – мікрроводоростей є використання безвідходних технологій, що можуть забезпечити здешевлення самого технологічного процесу (рис. 3.13).

Іноваційним підходом до одержання економічно доцільних енергоресурсів є поєднання суміжних технологій одержання біопалива I, II та III покоління (рис.3.14). Тобто, відходи при виробництві біопалива I чи II покоління, можуть бути використані для виробництва біопалива III покоління.

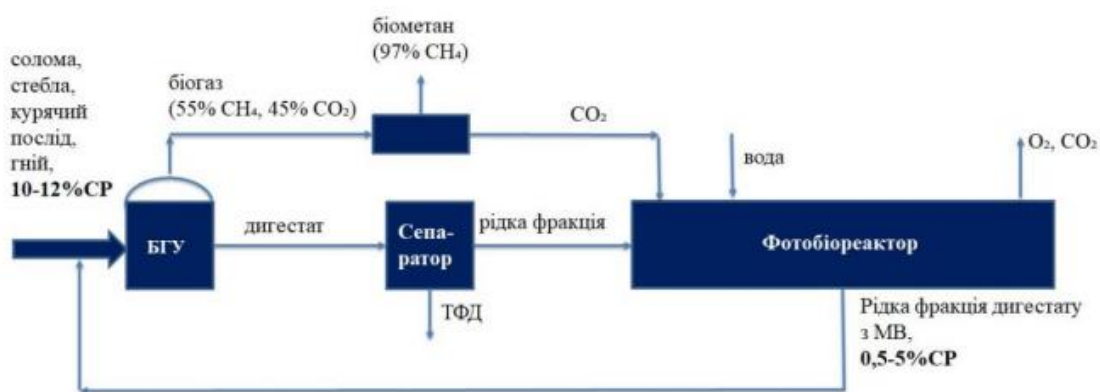


Рис. 3.14. Схема безвідходної кооперації одержання біогазу та культивування мікроорганізмів із використанням рідкої фракції дигестату для базового субстрату

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Опрацьовані дані літератури свідчить про наявність величезного потенціалу мікроводоростей у виробництві біопалива III покоління. Водночас існують технічні, економічні та нормативні бар'єри, що потребують подальших інноваційних підходів до удосконалення технології їх культивування.

2. Аналітичний аналіз вітчизняних та зарубіжних досягнень щодо виробництва біопалива III покоління переконливо показали його енергетичну, екологічну та господарську доцільність як поновлюваного джерела енергії.

3. Технологія одержання біодизелю із біомаси мікроводоростей науковцями та практиками розглядається як перспективні маловідходні чи безвідходні технології. Мікроводорості не вибагливі до умов культивування, вони на порядки більш продуктивніші продуценти ліпідів порівняно із іншими продуцентами.

4. Важливим напрямом є розвиток біорефінерійної концепції, за якої біомаса мікроводоростей використовується не тільки для отримання біопалива, а й для виробництва харчових добавок, кормів для тварин, фармацевтичних і косметичних продуктів. Це підвищує економічну привабливість процесу і зменшує ризики, пов'язані з коливаннями цін на енергію.

5. Виявлено, що найбільш активно проліферація клітин відбувалась за умови, коли використовували комбіноване освітлення із використанням червоного та синього спектрів. На 18 добу експерименту кількість біомаси мікроводоростей складала $0,58 \text{ г/дм}^3$, що на 48,3% переважала контроль.

6. Концентрація вуглеводів 4 г/л у поживному середовищі сприяла найбільшому нагромадженню біомаси мікроводоростей. На 18 добу культивування вихід біомаси мікроводоростей складав $0,61 \text{ г/дм}^3$ і відповідно перевищував на 5,0; 31,2 та 44,3% інші зразки.

Найвищий вміст ліпідів, 42% сухої біомаси, спостерігали у дослідноу зростоку, де у поживному середовищі використовували 4 г/л вуглеводного компоненту. За використання у культуральному середовищі вуглеводного компоненту в дозі 2 та 6 г/л вміст ліпідних фракцій складав відповідно 14 та 32% від сухої біомаси.

7. За використання NH_4Cl у поживному середовищі у дозі 2,0 г/л приріст ліпідів був найвищим і дорівнював $0,28 \text{ г/дм}^3$, що відповідало 45,8% від сухої біомаси. Використання $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ у зазначеній дозі забезпечує приріст ліпідів до $0,18 \text{ г/дм}^3$, що відповідало 28,1%. А без додаткового внесення джерел Нітрогену – культивування проходило виключно на середовищі Заррука приріст ліпідів був мінімальний – $0,06 \text{ г/дм}^3$, що відповідало 10,3% від загальної кількості біомаси водоростей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Олійник, О. В., Петренко, Г. Д., & Карпенко, В. П. (2021). Використання мікроводоростей для виробництва біопалива: сучасний стан та перспективи. *Вісник аграрної науки України*, №5, 45-54.
2. Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року. https://saee.gov.ua/sites/default/files/DraftNPDVE_2030_SAE_21_09_2022.pdf
3. Гончарук І.В. Організаційно-економічне забезпечення енергетичної незалежності агропромислового комплексу. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2020. № 2 (52). С. 23-38. DOI: 10.37128/2411-4413-2020-2-2
4. Матвеева О. Л., Кустовська А. Д., Шипілова А. Ю. Потенціал та перспективи вітчизняного виробництва біопалива на основі біомаси мікроводоростей. *Наукоємні технології* № 1(49), 2021. С. 84-91.
5. Іваненко, А. І., & Смирнова, Н. В. (2021). Сучасні методи оптимізації росту мікроводоростей. *Біотехнологія в Україні*, 18(1), 12-25.
6. Жолобецький Г. Чи приживеться біопаливо в Україні? [Електронний ресурс] / Г. Жолобецький. Режим доступу до інформації: <http://www.propozitsiya.com/?page=149&itemid=2783&number=91>
7. Савчук, В. П. (2020). Роль мікроводоростей у відновлювальній енергетиці. *Енергетика і екологія*, 10(2), 50-58.
8. Барило А.А., Бенменні М., Будько В.І., Будько М.О. та ін. Відновлювані джерела енергії: монографія. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
9. Гончарук І.В. Організаційно-економічне забезпечення енергетичної незалежності агропромислового комплексу. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2020. № 2 (52). С. 23-38. DOI: 10.37128/2411-4413-2020-2-2
10. Ayodele, B. V., Alsaffar, M. A., Mustapa, S. I. An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and

second-generation sugar-based feedstocks. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 245

11. Дорошенко, О. М. (2019). Технології виробництва біопалива з водоростей: проблеми та перспективи. *Науковий вісник НУХТ*, 28(3), 110-119.

12. Carneiro M. L., Pradelle F. M., Braga S. L et al. (2017). "Potential of biofuel from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA)". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, pp.632–653.

13. Ehrenberg R. Algae as biofuel still rough around the edges / Ehrenberg R. // *Sciencenews* January 26th, 2010 // [Електронний ресурс]. Точка доступу: http://www.sciencenews.org/view/generic/id/55665/title/Algae_as_biofuel_still_rough_around_the_edges/

14. Вчені створили майже ідеальне біопаливо [Електронний ресурс]. Клуб "Фінансист". Режим доступу: <http://news.finance.ua/ua/~1/0/all/2013/03/01/297700>

15. Бондаренко, Ю. М., & Шевченко, Т. В. (2018). Біоенергетичний потенціал мікрроводоростей. *Технології харчової промисловості*, 45(6), 77-85.

16. Зелена книга регулювання виробництва рідких моторних біопалив. URL:<https://brdo.com.ua/wpcontent/uploads/2022/05/Regulyuvannya-vyrobnny-tstva-ridkyh-motornyh-biopalyv.pdf>.

17. Прощаликіна А.М., Денисенко В. О., Прощаликін А.М. Проблеми та перспективи розвитку ринку біопалива в Україні. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". Серія: "Економічні науки". 2020. №12.

18. Singh, D., & Singh, J. (2014). Advances in microalgal biotechnology for sustainable biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 227-240.

19. KVAKUSHA. Біопаливо з водоростей. URL: <https://kvakusha.uk/biotoplivo-iz-vodoroslei-poluchenie-proizvodstvo-biotopliva-iz-vodoroslei.html>

20. Боднар О. І. Біотехнологічні перспективи використання мікроводоростей: основні напрями (огляд) / О. І. Боднар // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія. 2017. Вип. 1(68): Тернопільські біологічні читання - Ternopil Bioscience 2017. С. 138–146.
21. Кравченко, М. О. (2017). Вплив світлових умов на продуктивність мікроводоростей. *Український біотехнологічний журнал*, 12(1), 30-39.
22. Організація і економіка використання біоресурсів: підручник: 2-ге видання, перероблене і доповнене. Вінниця: ТОВ «Друк», 2020. 372 с.
23. Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2020 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-%D0%BF>
24. Ткаченко, І. В. (2018). Виробництво біопалива з мікроводоростей: технології та перспективи. *Технології енергозбереження*, 15(4), 15-27.
25. Мороз, В. В., & Петренко, Л. М. (2017). Вплив умов культивування на біомасу мікроводоростей. *Вісник екології та природокористування*, №2, 34-
26. Шевчук Г.В. Біопаливо з водоростей як напрям розвитку «зеленої» економіки: сучасний стан та перспективи. Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики, 2021, № 3. С.21-35. DOI: 10.37128/2411-4413-2021-3-2.
27. С. М. Уминський. Гідродинамічний апарат для виробництва біодизельного палива. Патент на корисну модель UA 127330U А 23К Заявлено 28.02.2018р. Опубл. 25.07.2018. Бюл .№14.
28. Журавель Д.П., Мілько Д.О., Бондар А.М. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. Механізація та

електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2019. Вип. № 10 (109). С. 125-131.

29. Журавель Д.П., Бондар А.М., Паніна В.В. Методологія оцінювання надійності дизельних двигунів при експлуатації на біодизелі. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. Вип. 7. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. С.30-39

30. Converti, A., et al. (2019). Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(6), 1146-1151.

31. Дубневич Ю. Економічна доцільність виробництва біопалива з ріпаку в Україні [Електронний ресурс] / Ю. Дубневич. Режим доступу: http://archive.nbuv.gov.ua/portal/chem_biol/vldau/APK/

32. Данилюк М. Є. Технологія одержання біостанолу з бурих водоростей: магістерська дис.: 162 Біотехнології та біоінженерія / Данилюк Михайло Єгорович. Київ, 2019. 118 с.

33. Івашків І. М. Економічні передумови використання відновлювальних енергетичних ресурсів на вітчизняних підприємствах в умовах розвитку зеленої енергетики. *Агросвіт*. 2020. № 13 / 14. С. 61–65.

34. Ortiz, D., et al. (2017). Microalgae biofuels: a review of cultivation, harvesting and extraction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 175-184.

35. Сегеда М. С. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії: навч. посібник. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2019. 204 с

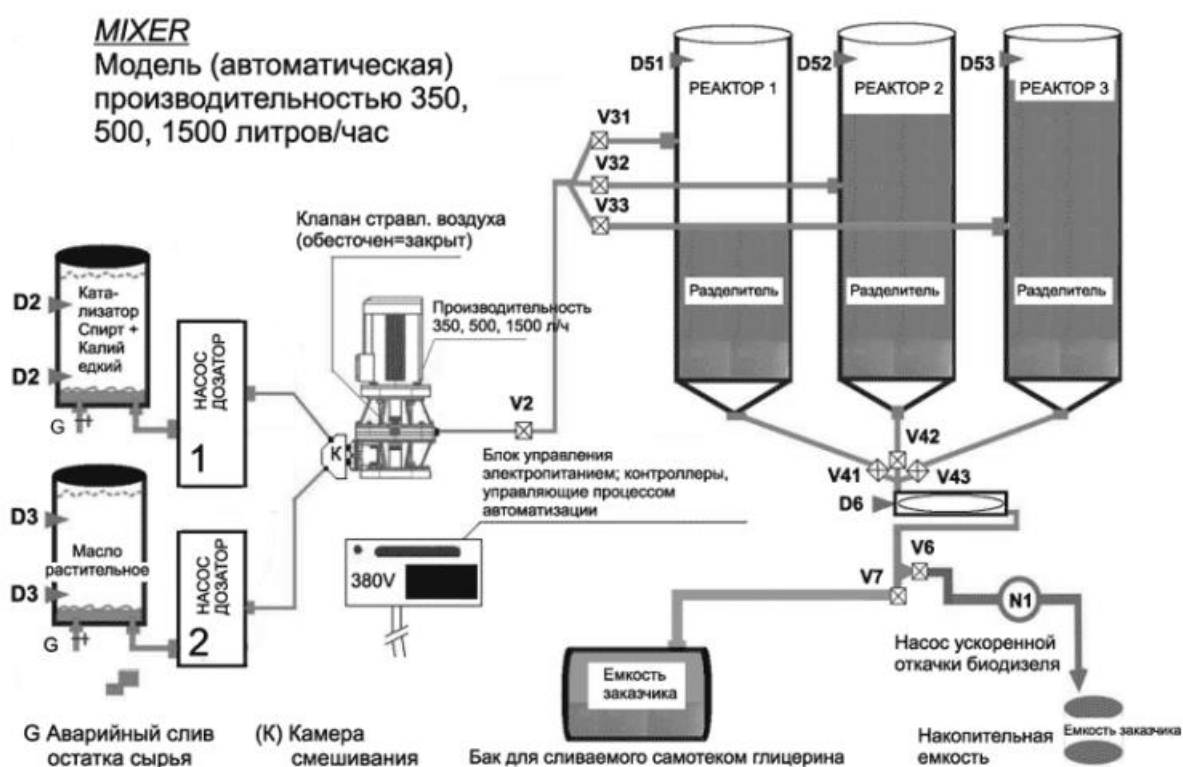
36. Pavliukh, L., Shamanskyi, S., Boichenko, S. and Jaworski, A. (2020). "Evaluation of the potential of commercial use of microalgae in the world and in Ukraine", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2020-0181>

37. Ma, X. N., et al. (2016). Progress in microalgae-based biodiesel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(3), 393-405.

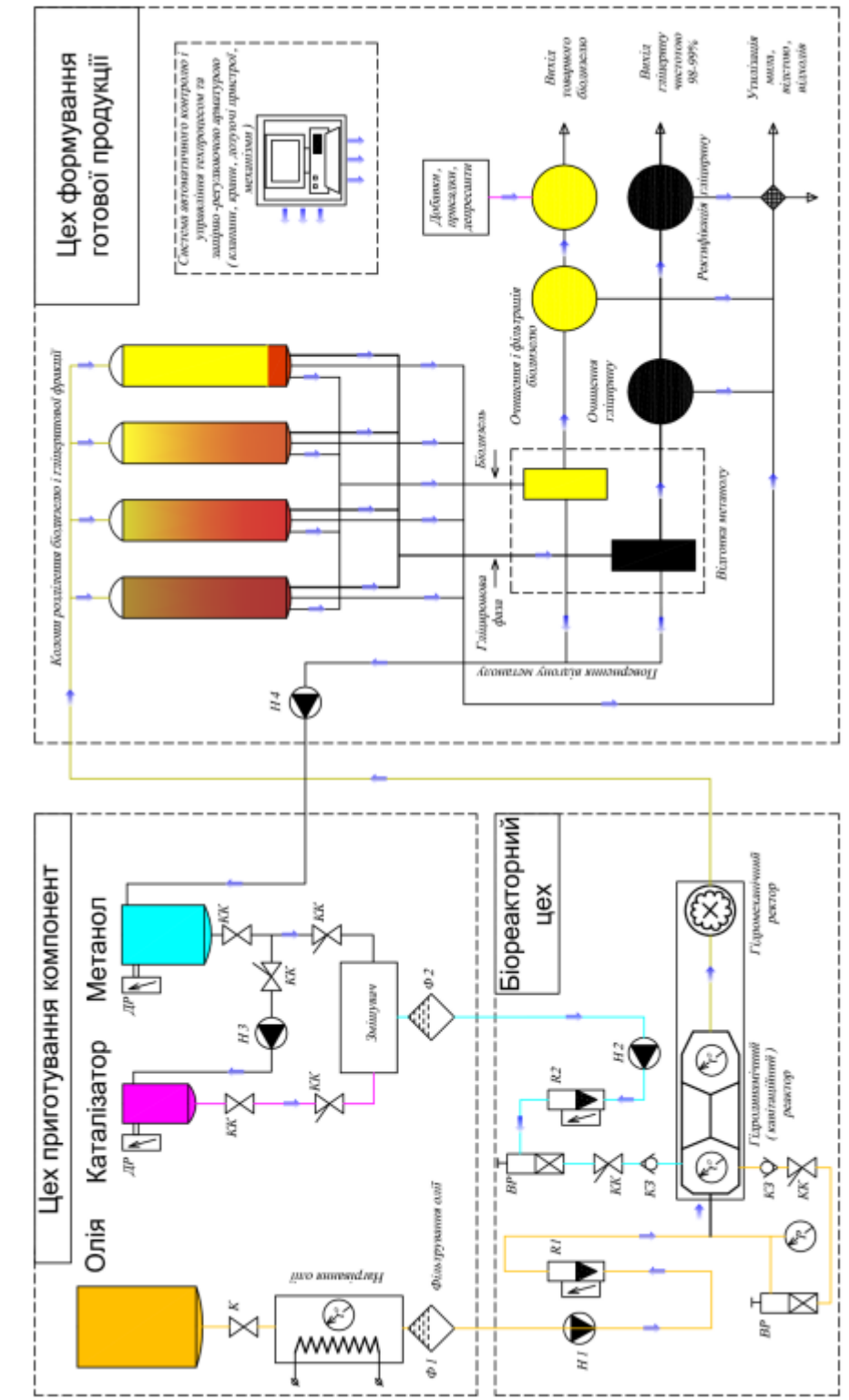
38. Strategy of sustainable development of Ukraine until 2030. (2019). Ukraine presidential decree No. 722/2019
39. Boichenko S. V., Pavliukh L., Shamansky S., Syrotina I., Todorovych O. (2020). Cascade Photobioreactor for Waste Water Treatment by Microalgae // Modern Management Review, Vol. XXV, No 27 (3/2020), p. 17–29. <https://doi.org/10.7862/rz.2020.mmr.19>
40. Коваленко, С. В., & Гончаренко, І. В. (2019). Біотехнологічні аспекти культивування мікроводоростей в умовах України. *Біотехнологія*, 13(2), 123-133.
41. Литвиненко, Ю. П., & Савченко, О. М. (2020). Мікроводорості як перспективний ресурс для отримання біопалива. *Екологічний вісник*, №3, 78-87.
42. Viktoriia Katysheva. About the problem of biological processes complicated by mass transfer / Vasyl Dyachok, Serhiy Huhlych, Yuri Yatchyshyn, Yulia Zaporochets, Viktoriia Katysheva // Chemistry & Chemical Technology. Lviv: Lviv Politechnic Publishing House, 2017. Vol 11. No 1. P. 111–116.
43. Голуб Н.Б. Використання штучного світла для культивування мікроводоростей *Chlorella vulgaris* / Н.Б. Голуб, І.І. Левтун // 17 Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика та енергоефективність» м. Київ 2016, С. 531–533.
44. Шаманський С. Й. Установка для біоконверсії сонячної енергії безперервної дії / С. Й. Шаманський // Наукоємні технології. 2015. №2 (26). С. 115–119.

ДОДАТКИ

Додаток А

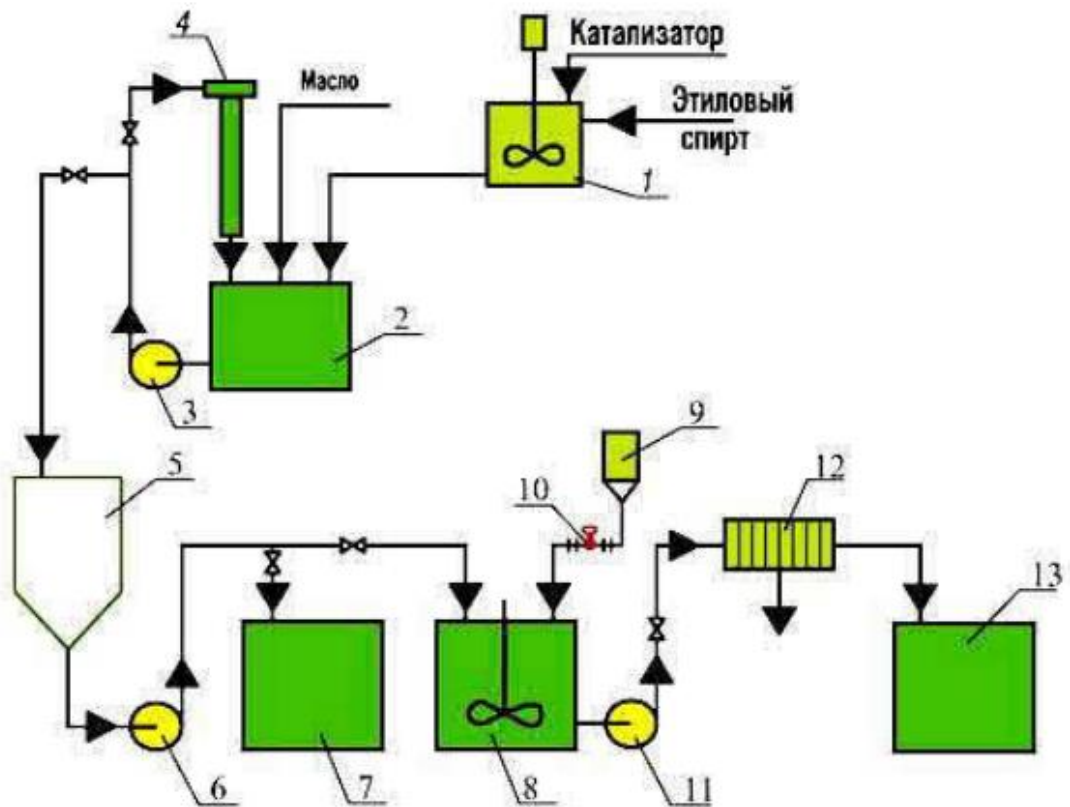


Установка MIXER для виробництва дизельного палива



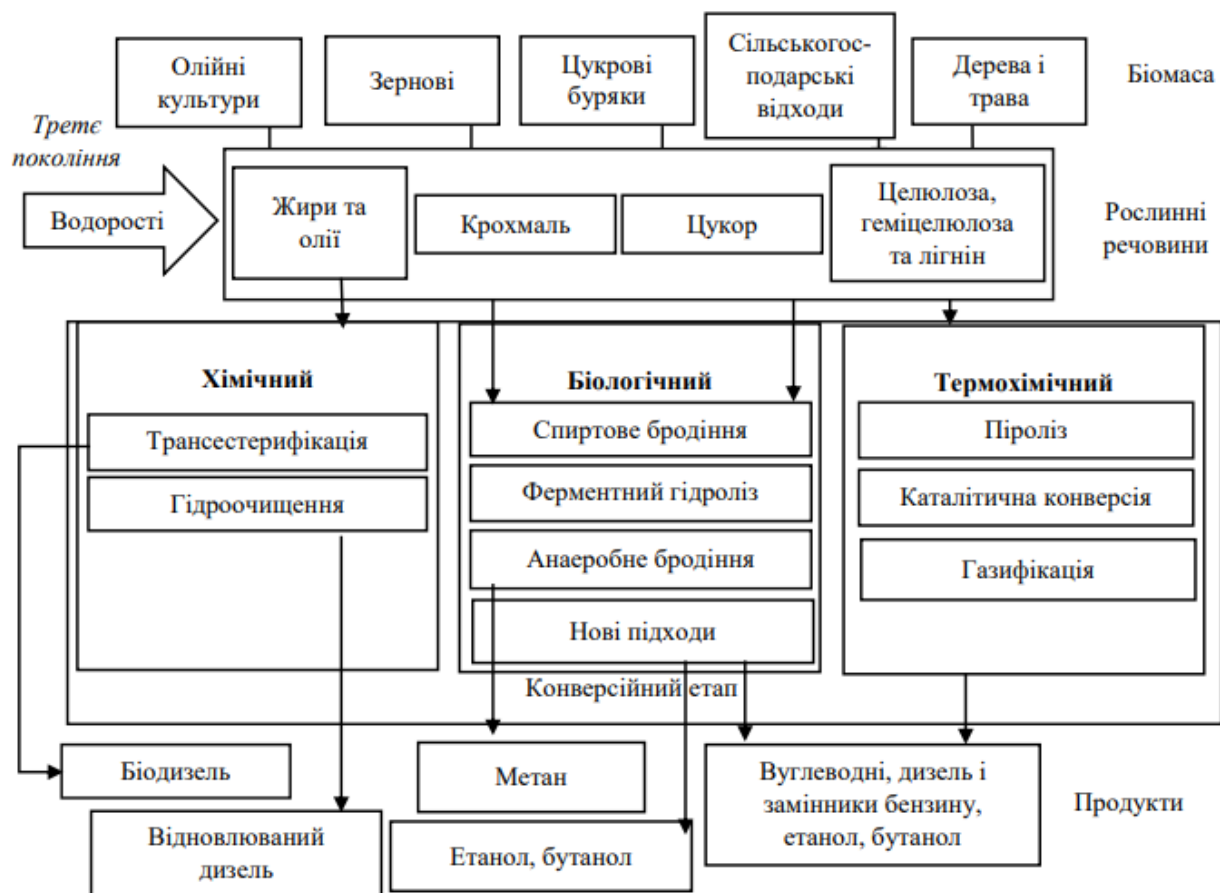
*К - крани шарові не керовані; КК - крани шарові керовані; КЗ - клапани зворотні; ВР - вентилі регулюючі; Ф - фільтри;
Н - насоси; R - витратоміри (ротометри); Р - датчики тиску, t° - датчики температури; ДР - датчики рівня*

Отримання біодизелю III покоління при застосуванні каталізатора



1 – реактор для одержання розчину каталізатору; 2 – реактор для синтезу біодизеля;
 3, 6, 11 – насоси; 4 – реактор кавітації; 5 – відстійник для відділення гліцеролової
 фракції; 7 – збірник гліцерину; 8 – контактна ємкість для змішування адсорбенту з
 біодизелем; 9 – бункер з адсорбентом; 10 – дозатор адсорбенту; 12 – фільтр;
 13 – резервуар для біодизеля

Технологічна схема одержання біодизелю за удосконаленою технологією



Субстрати для одержання різних поколінь біопалива