

ЗАТВЕРДЖЕНО
Наказ Міністерства освіти і науки,
молоді та спорту України
29 березня 2012 року №384

Форма № Н-9.02

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 бакалавра

на тему: “Напрями удосконалення технологічного процесу
виробництва біопалива третього покоління”

Виконала: студентка 4 курсу, групи 1
спеціальності

162 «Біотехнологія та біоінженерія»

Дерев'янчук Галина Володимирівна
(прізвище та ініціали)

Керівник: **проф. Буцяк В.І.**
(прізвище та ініціали)

Рецензент: **проф. Півторак Я.І.**
(прізвище та ініціали)

Робота заслухана на засіданні кафедри біотехнологій та радіології і
рекомендована до захисту в ЕК, протокол № 33 від 18.06 2024 р.

Завідувач кафедри біотехнологій та радіології

проф. Василь БУЦЯК

Львів – 2024

ЗАТВЕРДЖЕНО
Наказ Міністерства освіти і
науки, молоді та спорту України
29 березня 2012 року № 384
Форма № Н-9.01

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 біотехнологій та радіології
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
(шифр і назва)
Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри, голова циклової
комісії Буцяк В.І.
“ 26 ” 02 2024 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Дерев'янчук Галині Володимирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи “Напрями удосконалення технологічного процесу виробництва біопалива третього покоління”

Керівник кваліфікаційної роботи

Буцяк Василь Іванович, д.с.г.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 19 02 2024 року №139-4

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 14.06.2024 року

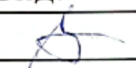



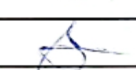
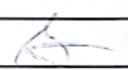
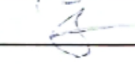
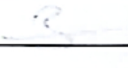
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи

Вихідні матеріали до виконання роботи: мікрководорості, біопаливо третього покоління, каталізатори, метилові естери жирних кислот, технологічний процес, поживні середовища, оптимізація, біодизель, фітобіореактор, замкнутий цикл виробництва.

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

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) графіки, діаграми, рисунки, технологічні схеми, технологічні лінії), рисунки: лабораторна установка вирощування водоростей за умов надходження у фітобіореактор різної концентрації вуглекислого газу та солей мікро- і макроелементів, батріококус браунії – майбутнє для біопалива III покоління, типи біопалива залежно від складу біомаси та технологічних прийомів переробки, субстрати для виробництва біопалива I-III покоління, технологічні аспекти одержання біопалива III покоління, типи систем вирощування мікроводоростей; схеми: роторного кавітаційного апарату, безвідходна технологія обертання біодизелю за використанням як базового субстрату ріпакову олію, принципова технологічна схема одержання біопалива III покоління на прикладі технології одержання біодизелю, блок-схема технології одержання біопалива третього покоління, схема будови фітобіореактора для культивування мікроводоростей.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної 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 15.03.2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання	примітка
1.	Літературний огляд.		
	I атестація:	26.04.24р.	30%
2.	Методика експерименту та основні методи досліджень.		20%
3.	Експериментальна частина.		35%
	II атестація:	30.05.24р.	55%
5.	Висновки та пропозиції		5%
	III атестація:	06.06.24р.	15%
	Допущено до захисту.	14.06.24р.	100%

Здобувач


(підпис)

Дерев'янчук Г.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи



Василь БУЦЯК.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	8
1.1. Характеристика біопалива III покоління	
1.2. Перспектива виробництва біопалива III покоління в Україні	
1.3. Технологічні аспекти виробництва біопалива третього покоління	
1.4. Підвищення ефективності культивування мікроводоростей	
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	
2.1. Матеріал і методи	
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	
3.1. Стан та перспектива одержання біодизелю як поновлювального джерела енергії	
3.2. Обґрунтування використання мікроводоростей для одержання біодизелю та особливості технологічного процесу	
3.3. Оптимізація технологічної ланки трансестерифікації в процесі виробництва біопалива III покоління	
3.4. Переваги та недоліки біопалива III покоління і перспективи виробництва біопалива в Україні	
ВИСНОВКИ	
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	
ДОДАТКИ	

АНОТАЦІЯ

Робота написана на 58 сторінках комп'ютерного тексту. Складається із трьох розділів (огляду літератури, умов та методики проведення досліджень, результатів досліджень), вступу, висновку, додатків, списку використаної літератури, що містить 36 джерела. Містить 21 рисунок, 9 таблиць та 5 додатки.

Ключові слова: мікроводорості, біопаливо третього покоління, каталізатори, метилові естери жирних кислот, технологічний процес, поживні середовища, оптимізація, біодизель, фітобіореактор, замкнутий цикл виробництва.

Представлена до захисту дипломна робота на тему: “Напрями удосконалення технологічного процесу виробництва біопалива третього покоління” присвячена актуальному напрямку щодо використання альтернативних поновлювальних джерел енергії, а саме удосконаленню вже існуючих технологій одержання біопалива III покоління. Це перспективні технології в основі, яких є використання біомаси мікроводоростей як субстрату для виробництва біопалива, в тому числі й біодизелю. Дані технології, через значну перевагу мікроводоростей в швидкості росту, приросту біомаси та не вибагливості до поживного середовища порівняно із іншими олійними культурами, все активніше використовуються як за кордоном, так й в нашій країні.

У матеріалах дипломної роботи опрацьовані літературні дані щодо сучасних розробок зарубіжних та вітчизняних технологій, які забезпечують одержання біопалива III покоління. Із аналізу літературних даних обґрунтована доцільність використання біомаси мікроводоростей для виробництва біодизелю. Шляхом експериментальних досліджень було встановлено, що використання кислих каталізаторів (сульфатна кислота) є більш економічно доцільно порівняно із використанням лужних каталізаторів

(гідроксид калію). Описано як класичні, так й експериментальні технологічні процеси виробництва біодизелю як біопалива III покоління. Проаналізовано принципову технологічну схему на етапі трансестерифікації біомаси мікроводоростей з одержанням естерів із жирних кислот та метанолу.

Об'єкти дослідження – технологічний процес виробництва біопалива III покоління на прикладі одержання біодизелю із біомаси мікроводоростей.

Предмет дослідження – перспективи щодо виробництва та застосування біопалива III покоління.

Метою роботи – аналіз сучасних технологій виробництва біопалива III покоління та оптимізація окремих ланок технології одержання біодизелю із біомаси мікроводоростів.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

- опрацювати доступну літературу та інтернет ресурси щодо сучасного стану виробництва та використання біопалива III покоління, на прикладі виробництва біодизелю із біомаси водоростей;
- обґрунтувати доцільність використання мікроводоростей для виробництва біопалива III покоління;
- ознайомитися із технологічними особливостями одержання біодизелю із біомаси мікроводоростів. Подати принципові технологічні схеми та основні етапи одержання метилових естерів вищих жирних кислот;
- обґрунтувати застосування кислотних каталізаторів у технологічному процесі переробки біомаси водоростей та оптимізувати технологічну ланку трансестерифікації в процесі виробництва біопалива III покоління
- дослідити стан та перспективи виробництва біопалива III покоління в Україні, дослідити їх переваги та недоліки;

– розробити технологічну схему виробництва моторного палива, подати технічну характеристику біодизеля.

Актуальність теми. В умовах військового стану, особливо, коли російські війська цілеспрямовано знищують інфраструктуру, зокрема, енергогенеруючі об'єкти стає очевидним щодо розвитку невеликих, локальних підприємств для виробництва поновлювальних джерел енергії. До таких джерел енергії, в основному, відносяться біогаз, біоетанол, біодизель, біоводень та інші. Враховуючи субстрат, із якого одержують те чи інше паливо, їх поділяють на біопаливо першого (сільськогосподарські культури), другого (непродовольчі джерела), третього (водорості) та четвертого (інші джерела) покоління.

На даний час є актуальним та перспективним розробляти і удосконалювати технології щодо виробництва біопалива III покоління, використовуючи мікроскопічні водорості як базовий субстрат. Мікроскопічні водорості завдяки фотосинтезуючій системі здатні акумулювати енергію сонячних фотонів у енергію хімічних зв'язків синтезованих органічних речовин. Вони невибагливі до поживного середовища, активно нарощують біомасу, швидкість росту в 20-30 рази перевищує швидкість росту рослин, продукують у 20-90 разів більшу кількість олії з одиниці площі, порівняно із рослинними оліями. Тому, їх використання як субстрату для одержання біодизелю може вирішити проблеми забезпечення енергією як на локальному, так й на глобальному рівнях.

Науковий внесок роботи. Встановлено, що економічно доцільно переробляти біомасу мікрowodоростей *in situ* (на місці), без додаткових технологічних ланок щодо висушування біомаси та екстракції ліпідів. Застосування такої технології вимагає використовувати як каталізатор сульфатну кислоту в концентрації 12 моль упродовж 18 годин за дотримання температури 110°C та вологості субстрату.

Практична цінність роботи зводиться до того, що на етапі трансестерифікації біомаси мікроводоростей з одержанням естерів із високомолекулярних жирних кислот та метанолу доцільно використовувати як каталізатор – сульфатну кислоту. Використання кислого каталізатора – H_2SO_4 в концентрації 12 моль у розрахунку 0,2 мг в перерахунку на 1 мл олії забезпечило підвищення на 16,2% одержання метилових естерів, що забезпечило вихід останніх на рівні 74,6% із біомаси мікроводоростей

ВСТУП

Сучасний світ зіткнувся з проблемою виснаження традиційних джерел енергії та негативного впливу викопного палива на навколишнє середовище. Зростаючий попит на енергію, виснаження запасів викопного палива та негативний вплив його використання на навколишнє середовище вимагають пошуку альтернативних джерел енергії. Одним з найбільш перспективних напрямків є розвиток біопалива, яке виробляється з відновлюваної біомаси [1].

Біопаливо третього покоління, яке отримують з мікроводоростей, вважається одним з найбільш перспективних видів біопалива. Мікроводорості мають ряд переваг перед іншими джерелами біомаси, такими як висока продуктивність, здатність до швидкого росту, можливість використання неродючих земель та солоної води, а також здатність до поглинання вуглекислого газу з атмосфери [1].

Проте, технологія виробництва біопалива третього покоління все ще знаходиться на стадії розвитку і має ряд недоліків, таких як високі витрати на культивування та переробку мікроводоростей, технологічна складність процесу та необхідність вирішення питань, пов'язаних з використанням води та поживних речовин [2].

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Характеристика біопалива III покоління

Біопаливо третього покоління - це новий тип біопалива, яке отримують з водоростей, мікроводоростей, лігноцелюлози та інших нехарчових біоматеріалів. Цей тип біопалива має багато переваг перед біопаливом першого та другого покоління, таких як [3]:

- Висока енергетична щільність
- Можливість використання нехарчових біоматеріалів
- Низький викид парникових газів
- Стійкість до посухи та інших несприятливих умов

Біопаливо третього покоління відрізняється від біопалива першого та другого покоління тим, що воно виробляється з мікроводоростей, які не конкурують з продовольчими культурами за землю та воду. Мікроводорості мають високу продуктивність біомаси, швидкий ріст та здатність до фотосинтезу, що робить їх привабливою сировиною для виробництва біопалива.

Біопаливо третього покоління має ряд переваг над викопним паливом: Екологічні переваги [4]:

- Відновлюваність. Біопаливо є відновлюваним джерелом енергії, оскільки мікроводорості можуть бути вирощені та перероблені знову і знову. На відміну від викопного палива, яке є обмеженим ресурсом, біопаливо може забезпечити стабільне джерело енергії на довгі роки.

- Зменшення викидів парникових газів. При спалюванні біопалива виділяється вуглекислий газ, який поглинається мікроводоростями під час росту. Це створює замкнутий цикл вуглецю, що значно зменшує викиди парникових газів порівняно з викопним паливом.

- Поліпшення якості повітря. Біопаливо містить менше шкідливих домішок, таких як сірка та важкі метали, ніж викопне паливо. Це сприяє зменшенню забруднення повітря та покращенню здоров'я людей.

Економічні переваги [5]:

- Енергетична безпека. Виробництво біопалива сприяє зменшенню залежності від імпорту викопного палива, що підвищує енергетичну безпеку країни.

- Використання територій. Вирощування мікроводоростей може здійснюватися на неродючих землях.

Технологічні переваги [12]:

- Універсальність. Біомаса мікроводоростей може бути перероблена на різні види біопалива, такі як біодизель, біоетанол та біогаз. Це дозволяє вибрати оптимальний варіант залежно від потреб та наявних технологій.

- Висока продуктивність. Мікроводорості мають високу продуктивність біомаси, що дозволяє отримувати значну кількість біопалива з відносно невеликої площі.

- Можливість використання різних джерел вуглецю. Мікроводорості можуть використовувати різні джерела вуглецю, включаючи CO₂ з промислових викидів, що сприяє зменшенню забруднення навколишнього середовища.

Виробництво біопалива третього покоління все ще перебуває на ранній стадії розробки, але воно має великий потенціал для заміни викопного палива.

Основні напрямки удосконалення технологічного процесу виробництва біопалива третього покоління (табл 1.1) [6]:

- Розробка нових методів культивування водоростей та мікроводоростей. Існуючі методи культивування водоростей та мікроводоростей є дорогими та неефективними. Необхідно розробити нові методи, які дозволять знизити витрати та підвищити продуктивність.

- Розробка нових методів переробки біомаси. Існуючі методи переробки біомаси є складними та енергоємними. Необхідно розробити нові методи, які дозволять спростити процес переробки та знизити його енергоємність.

Технологічний процес виробництва біодизелю з ліпідів мікроводоростей

Етап	Опис процесу	Методи	Обладнання
1. Культивування мікроводоростей	Вирощування мікроводоростей з високим вмістом ліпідів у фотобіореакторах або відкритих водоймах.	Відкриті ставки, закриті фотобіореактори, гібридні системи.	Фотобіореактори, системи освітлення, аерації та перемішування.
2. Збір та обробка біомаси	Відокремлення мікроводоростей від середовища культивування та зменшення вмісту вологи.	Флокуляція, флотація, фільтрація, центрифугування, сушка.	Центрифуги, фільтр-преси, сушарки.
3. Екстракція ліпідів	Виділення ліпідів з біомаси.	Механічні методи (пресування, екструзія), хімічні методи (екстракція розчинниками - гексан, хлороформ, надкритичний CO ₂).	Преси, екстрактори, сепаратори.
4. Трансестерифікація	Перетворення ліпідів (тригліцеридів) на метилові ефіри жирних кислот (біодизель) шляхом реакції з метанолом або етанолом у присутності каталізатора (луг, кислота, ферменти).	Лужна, кислотна або ферментативна трансестерифікація.	Реактори, змішувачі, нагрівачі.
5. Очищення	Видалення залишків каталізатора, гліцерину та інших домішок з біодизелю.	Відмивання водою, нейтралізація, дистиляція, адсорбція.	Сепаратори, колони дистиляції, адсорбери.

продовження табл 1.1

6. Контроль якості	Перевірка якості отриманого біодизелю на відповідність стандартам.	Визначення цетанового числа, вмісту води та механічних домішок, кислотності, в'язкості тощо.	Лабораторне обладнання для аналізу палива.
--------------------	--	--	--

- Розробка нових каталізаторів та ферментів. Каталізатори та ферменти використовуються для перетворення біомаси на біопаливо. Необхідно розробити нові каталізатори та ферменти, які дозволять підвищити ефективність процесу перетворення.

- Інтеграція технологій виробництва біопалива третього покоління з іншими технологіями. Технології виробництва біопалива третього покоління можна інтегрувати з іншими технологіями, такими як технології уловлювання та зберігання вуглецю, для створення більш стійких систем виробництва енергії.

Очікувані результати.

Очікується, що удосконалення технологічного процесу виробництва біопалива третього покоління призведе до [7]:

- Зниження вартості виробництва біопалива
- Збільшення продуктивності виробництва біопалива
- Зниження викидів парникових газів
- Зростання використання біопалива в енергетичному секторі.

1.2. Перспектива виробництва біопалива III покоління в Україні

О. П. Скорук у своїй праці "Розвиток ринку біопалива в Україні та світі" проводить ґрунтовне дослідження стану та перспектив розвитку ринку біопалива в Україні та світі. Автор описує основні типи біопалива, їхні характеристики та технології виробництва. Він також аналізує фактори, що впливають на розвиток ринку біопалива, такі як державна політика, ціни на енергоносії, екологічні стандарти та науково-технічний прогрес.

Скорук підкреслює, що біопаливо має значний потенціал для вирішення проблем енергетичної безпеки та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Він зазначає, що Україна має сприятливі умови для розвитку виробництва біопалива, такі як значні ресурси біомаси, розвинена аграрна сфера та науково-технічний потенціал [8].

Автор описує державну політику України щодо стимулювання розвитку ринку біопалива. Він аналізує прийняті законодавчі акти, державні програми та інші заходи підтримки виробництва та споживання біопалива.

Скорук також досліджує стан ринку біопалива в інших країнах світу. Він порівнює державні політики різних країн, аналізує досвід країн-лідерів у цій галузі.

Автор робить висновок, що ринок біопалива в Україні та світі має значні перспективи розвитку. Він зазначає, що для реалізації цього потенціалу необхідно вжити низку заходів, таких як удосконалення державної політики, стимулювання інвестицій у цю галузь та проведення науково-дослідницьких робіт [16].

Підручник "Біоенергетика" під редакцією М.В. Безпарточного, опублікований у 2011 році, хоча й не зосереджується виключно на біопаливі третього покоління, містить цінну інформацію про цю галузь.

Розділ 9 "Біопаливо та біогаз" присвячений загальним питанням виробництва та використання біопалива, включаючи біопаливо третього покоління.

Автор описує різні види сировини, які можуть використовуватися для виробництва біопалива третього покоління, такі як мікроводорості, лігноцелюлозна сировина та відходи; надає загальний опис методів, що застосовуються для виробництва біопалива третього покоління, включаючи біохімічні, термохімічні та електрохімічні процеси; пише про потенційні переваги біопалива третього покоління, такі як висока стійкість та низький викид парникових газів, а також можливі труднощі, пов'язані з його виробництвом, такі як висока вартість та низька продуктивність; аналізує майбутнє біопалива третього покоління в Україні та світі [9].

У 2022 році Національний університет біоресурсів і природокористування України (НУБіП) опублікував дослідження, присвячене перспективам використання мікроводоростей для виробництва біопалива в Україні. Цей огляд розглядає ключові висновки та рекомендації дослідження, а також аналізує його внесок у розуміння потенціалу мікроводоростей як джерела відновлюваної енергії в Україні.

Ключові висновки дослідження [10]:

1. **Високий потенціал мікроводоростей:** дослідження підтверджує, що мікроводорості мають значний потенціал для виробництва біопалива в Україні завдяки їх швидкому росту, високій продуктивності біомаси та здатності до використання різних джерел вуглецю, включаючи CO₂.

2. **Різноманіття видів:** Україна має багатий видовий склад мікроводоростей, що відкриває можливості для вибору оптимальних штамів для виробництва біопалива з урахуванням кліматичних та екологічних умов різних регіонів.

3. **Технологічні виклики:** дослідження визначає ключові технологічні виклики, пов'язані з культивуванням, збиранням та переробкою мікроводоростей, включаючи необхідність оптимізації процесів, зниження витрат та підвищення ефективності.

4. **Економічна доцільність:** дослідження підкреслює важливість проведення детального економічного аналізу для визначення

конкурентоспроможності біопалива з мікроводоростей порівняно з традиційними видами палива та іншими джерелами відновлюваної енергії.

5. Екологічні переваги: використання мікроводоростей для виробництва біопалива має потенціал для зменшення викидів парникових газів, покращення якості води та зменшення залежності від імпорту викопного палива.

Рекомендації дослідження [11]:

1. Подальші дослідження. Необхідно продовжувати дослідження з метою оптимізації технологій культивування, збирання та переробки мікроводоростей, а також вивчення їх потенціалу для виробництва не лише біопалива, але й інших цінних продуктів, таких як білок, корми та добрива.

2. Розробка нормативно-правової бази. Важливо створити сприятливе нормативно-правове середовище для розвитку галузі виробництва біопалива з мікроводоростей, включаючи стандарти якості, механізми підтримки та стимули для інвесторів.

3. Співпраця та обмін досвідом. Необхідно розвивати співпрацю між науковими установами, бізнесом та державними органами для обміну досвідом, технологіями та знаннями в галузі виробництва біопалива з мікроводоростей.

Дослідження НУБіП є важливим внеском у розуміння потенціалу мікроводоростей як джерела відновлюваної енергії в Україні. Воно надає цінну інформацію для розробки стратегій та політики у сфері енергетики, а також стимулює подальші дослідження та інвестиції в цю перспективну галузь [22].

Дослідження НУБіП підтверджує, що Україна має значний потенціал для розвитку виробництва біопалива з мікроводоростей. Реалізація цього потенціалу вимагає подальших досліджень, розробки відповідної нормативно-правової бази та активної співпраці між усіма зацікавленими сторонами.

1.3. Технологічні аспекти виробництва біопалива третього покоління

Сучасний стан розвитку технологій виробництва біопалива третього покоління характеризується активними дослідженнями та розробками в різних країнах світу. В Україні також проводяться дослідження в цій галузі, але поки що на рівні лабораторних та пілотних проектів (рис. 1.1).

Топ-5 виробників біопалива



Джерело: Міжнародне енергетичне агенство (IEA)

Рис. 1.1. Виробництво біопалива в світі [13].

У 2021 році науковий журнал "Енергетика та електрифікація" опублікував статтю, присвячену аналізу можливостей та викликів використання мікроводоростей для виробництва біопалива в Україні.

Ключові моменти статті [14].

1. Стаття підкреслює високий потенціал мікроводоростей як джерела біопалива, завдяки їх швидкому росту, високій продуктивності біомаси, здатності до фіксації CO₂ та можливості використання неродючих земель для культивування.

2. Автори статті аналізують специфічні умови України, які сприяють розвитку цієї галузі, включаючи сприятливий клімат, наявність водних ресурсів та науково-технічний потенціал.

3. Стаття визначає ключові технологічні перешкоди, які необхідно подолати для успішного розвитку виробництва біопалива з мікродоростей в Україні. Це включає оптимізацію процесів культивування, збору та переробки біомаси, а також розробку ефективних та економічно вигідних технологій.

4. Автори розглядають економічні аспекти виробництва біопалива з мікродоростей, включаючи аналіз витрат на виробництво, потенційні ринки збуту та можливість створення нових робочих місць.

5. Стаття підкреслює екологічні переваги використання мікродоростей для виробництва біопалива, такі як зменшення викидів парникових газів, покращення якості води та зменшення залежності від імпорту викопного палива.

Висновки та рекомендації [15].

Автори статті роблять висновок, що виробництво біопалива з мікродоростей має значний потенціал для України, але його реалізація вимагає подолання ряду технологічних та економічних труднощів. Вони рекомендують зосередити зусилля на дослідженнях та розробках, створенні сприятливого інвестиційного клімату та розвитку співпраці між наукою, бізнесом та державою.

Внесок статті

Стаття, опублікована в журналі "Енергетика та електрифікація", є важливим внеском у дискусію про розвиток відновлюваної енергетики в Україні. Вона надає всебічний аналіз можливостей та викликів виробництва біопалива з мікродоростей, що може бути корисним для науковців, підприємців та політиків.

Journal of Applied Phycology є провідним науковим журналом, що публікує дослідження в галузі прикладної фікології, включаючи виробництво біопалива третього покоління з мікроводоростей.

Journal of Applied Phycology публікує дослідження, які вивчають різні види мікроводоростей, їх характеристики та потенціал для виробництва біопалива. Особлива увага приділяється видам з високим вмістом ліпідів, швидким ростом та стійкістю до різних умов культивування.

Дослідження в журналі демонструють, що вибір оптимального виду мікроводоростей є ключовим фактором для ефективного виробництва біопалива.

Технології культивування [17].

- Journal of Applied Phycology висвітлює різні технології культивування мікроводоростей, включаючи відкриті ставки, закриті фотобіореактори та гібридні системи.

- Дослідження в журналі аналізують переваги та недоліки кожної технології, а також пропонують шляхи оптимізації процесів культивування для підвищення продуктивності та зниження витрат.

Методи переробки біомаси [18].

- Journal of Applied Phycology публікує дослідження, присвячені різним методам переробки біомаси мікроводоростей для отримання біопалива, таким як екстракція ліпідів, термохімічна конверсія та біохімічна конверсія.

- Дослідження в журналі вивчають ефективність та економічну доцільність різних методів переробки, а також пропонують шляхи їх удосконалення.

Journal of Applied Phycology є цінним джерелом інформації про біопаливо третього покоління. Дослідження, опубліковані в цьому журналі, свідчать про значний потенціал мікроводоростей як джерела відновлюваної енергії та пропонують шляхи вирішення технологічних та економічних викликів, пов'язаних з їх використанням.

У статті "Advances in microalgae cultivation and harvesting for biofuel production" (2020), опублікованій у журналі *Biotechnology Advances*, автори Mata, Martins та Caetano розглядають сучасні досягнення у сфері культивування та збору мікроводоростей для виробництва біопалива.

Стаття приділяє значну увагу оптимізації умов культивування мікроводоростей, таких як освітлення, температура, рН та склад поживних речовин. Автори підкреслюють важливість цих факторів для досягнення максимальної продуктивності біомаси.

Автори розглядають різні методи збору та концентрування біомаси мікроводоростей, обговорюють перспективи розвитку технологій культивування та збору мікроводоростей, включаючи використання генетично модифікованих штамів, інтеграцію з іншими промисловими процесами та розробку нових методів збору та концентрування.

Автори роблять висновок, що культивування та збір мікроводоростей є ключовими етапами у виробництві біопалива, і їх оптимізація має вирішальне значення для досягнення економічної та екологічної стійкості цієї галузі.

Технологічний процес виробництва біопалива третього покоління складається з кількох етапів [19]:

1. Культивування мікроводоростей:

- Відкриті системи (ставки, басейни)
- Закриті системи (фотобіореактори)
- Вибір системи культивування залежить від кліматичних умов, виду мікроводоростей та економічних факторів.

2. Збір та підготовка біомаси:

- Методи збору: фільтрація, центрифугування, флокуляція
- Підготовка біомаси: сушіння, подрібнення

3. Переробка біомаси:

- Механічні методи [19]:

- Пресування/віджимання. Використовується для видалення вологи з біомаси, що спрощує подальшу переробку.
- Подрібнення/гомогенізація. Збільшує площу поверхні біомаси, покращуючи доступність компонентів для екстракції або перетворення.
- Ультразвукова обробка. Порушує клітинні стінки водоростей, вивільняючи внутрішньоклітинні компоненти.
- Хімічні методи [20]:
 - Екстракція розчинниками. Використовується для вилучення ліпідів (для біодизелю) та пігментів з біомаси водоростей. Найчастіше застосовуються органічні розчинники, такі як гексан, хлороформ або етанол.
 - Кислотний/лужний гідроліз. Розщеплює складні вуглеводи (полісахариди) на прості цукри, які можуть бути використані для ферментації та отримання біоетанолу.
 - Трансестерифікація. Перетворює тригліцериди (основний компонент олії водоростей) на метилові ефіри жирних кислот (біодизель).
 - Біологічні методи (ферментація):
 - Анаеробна ферментація. Використовується для отримання біогазу (суміш метану та вуглекислого газу) з біомаси водоростей за допомогою мікроорганізмів в анаеробних умовах.
 - Алкогольна ферментація. Перетворює цукри, отримані в результаті гідролізу, на біоетанол за допомогою дріжджів або бактерій.
 - Термохімічні методи:
 - Піроліз. Термічне розкладання біомаси за відсутності кисню з утворенням біо-олії, біогазу та біовугілля.
 - Газифікація. Термічне перетворення біомаси на синтез-газ (суміш водню та чадного газу), який може бути використаний для виробництва різних видів палива та хімічних речовин.
 - Гідротермальне зрідження. Перетворення біомаси на біо-олію під високим тиском та температурою у водному середовищі.
 - Комбіновані методи [16]:

Часто використовуються комбінації різних методів для досягнення максимальної ефективності та отримання широкого спектру продуктів. Наприклад, можна поєднати механічну та хімічну обробку для вилучення ліпідів, а потім використовувати залишкову біомасу для анаеробної ферментації та отримання біогазу.

4. Отримання кінцевого продукту [12]:

- Біодизель
- Біоетанол
- Біогаз

Вибір кінцевого продукту залежить від методу переробки біомаси та цільового призначення біопалива.

У свою чергу, вибір методу переробки залежить від:

- Виду водоростей. Різні види мають різний склад біомаси, що впливає на вибір оптимального методу.
- Бажаного продукту. Вибір методу залежить від того, який продукт необхідно отримати (біодизель, біоетанол, біогаз, білок, ліпіди, пігменти).
- Технічних та економічних можливостей. Деякі методи є більш складними та дорогими, ніж інші.

"Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology" (2022), під редакцією Амоса Річмонда, є комплексним посібником, що охоплює широкий спектр тем, пов'язаних з культивуванням мікроводоростей та їх застосуванням у біотехнології. Розділ, присвячений застосуванню мікроводоростей у біотехнології, детально розглядає різноманітні способи використання цих мікроорганізмів для отримання цінних продуктів та послуг, в тому числі біопаливо:

- Виробництво біодизелю з ліпідів мікроводоростей.
- Виробництво біоетанолу з вуглеводів мікроводоростей.
- Виробництво біогазу шляхом анаеробного зброджування біомаси мікроводоростей.

Основні напрями удосконалення технологічного процесу виробництва біопалива третього покоління:

1.4. Підвищення ефективності культивування мікродоростей.

- Оптимізація умов культивування (температура, освітлення, поживні речовини)
- Використання генетично модифікованих штамів мікродоростей з підвищеною продуктивністю біомаси та вмістом ліпідів
- Розробка нових типів фотобіореакторів з підвищеною ефективністю використання світла та зниженими енерговитратами [16].

Удосконалення методів збору та підготовки біомаси [32]:

- Розробка ефективних та економічних методів збору біомаси з низьким енергоспоживанням
- Оптимізація процесів сушіння та подрібнення біомаси для зниження витрат енергії та підвищення якості сировини

Розробка нових та вдосконалення існуючих методів переробки біомаси

[18]:

- Використання ферментативних методів гідролізу для підвищення ефективності та зниження вартості процесу
- Застосування нових каталізаторів для процесів трансестерифікації та гідрокрекінгу для підвищення виходу та якості біопалива
- Розробка методів комбінованої переробки біомаси для отримання різних видів біопалива та інших цінних продуктів

Підвищення якості та стабільності кінцевого продукту [23]:

- Розробка методів очищення та стабілізації біопалива для забезпечення його відповідності стандартам якості та підвищення терміну зберігання

- Використання добавок для покращення експлуатаційних характеристик біопалива, таких як цетанове число, в'язкість та температура застигання

Біопаливо третього покоління має значний потенціал для заміщення викопного палива та забезпечення сталого енергетичного майбутнього. Його екологічні, економічні та технологічні переваги роблять його привабливою альтернативою для України та інших країн світу.

Висновки до огляду літератури

Біопаливо третього покоління є перспективним джерелом відновлюваної енергії, яке має значний потенціал для заміни викопного палива. Для широкого впровадження біопалива третього покоління необхідно продовжувати дослідження та розробки в галузі удосконалення технологічного процесу його виробництва, спрямовані на підвищення ефективності, зниження вартості та покращення якості біопалива.

Водорості мають значний потенціал для виробництва не лише біопалива, а й інших цінних продуктів, таких як білок, ліпіди, пігменти та інші біологічно активні речовини. Це робить їх перспективною сировиною для розвитку біоекономіки та створення нових галузей промисловості.

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Матеріал та методи

Через невибагливість до умов зростання та елементів живлення технологія щодо вирощування мікроводоростів та одержання олії для подальшої переробки на біодизель є досить проста і не вимагає складного апаратурного забезпечення. Її можна повністю автоматизувати і забезпечити безперервний режим культивування мікроводоростей, дотримуючись усіх необхідних вимог для росту клітин у культурі на поживному середовищі.

Сам процес екстракції ліпідів із клітин мікроводоростей проводили на роторному імпульсно-кавітаційному апараті (рис. 2.1), який забезпечував вихід ліпідної фракції в межах 88-92% [34]. А знежирену біомасу мікроводоростей, у склад якої входить значна частина легкозасвоюваних протеїнів, мінеральних та біологічно активних речовин використовували як кормову добавку.

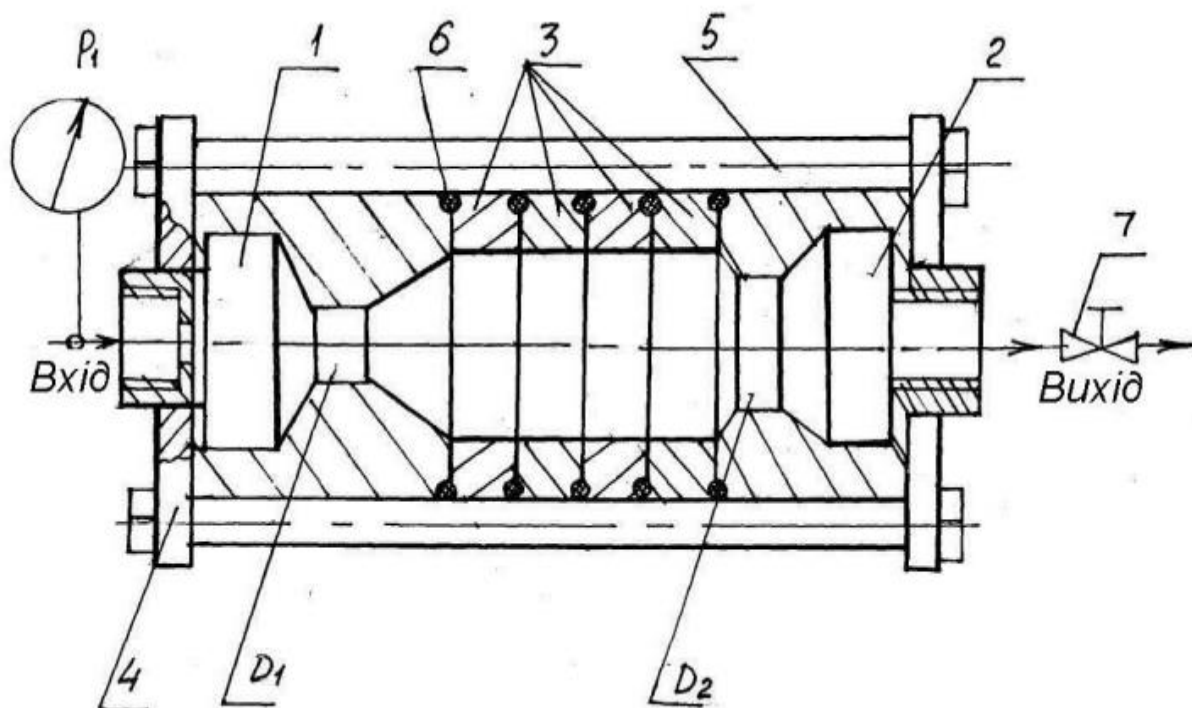


Рис. 2.1. Схема роторного кавітаційного апарату.

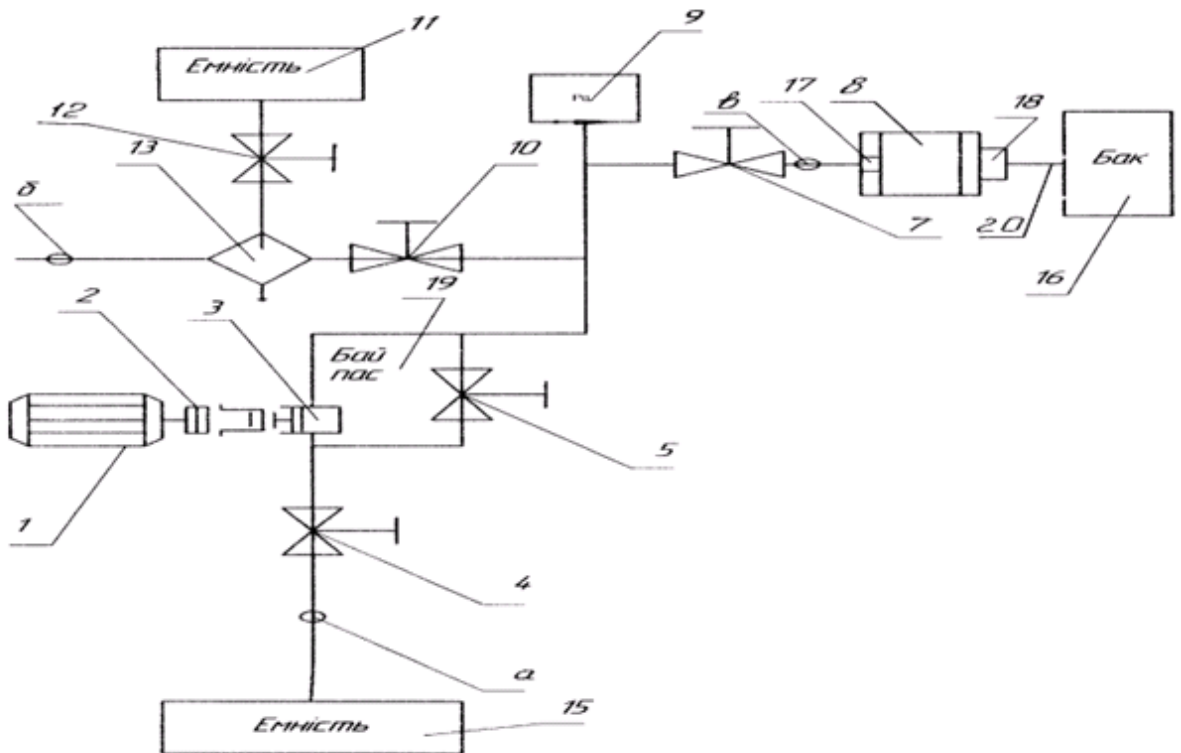


Рис.2.2. Принципова технологічна схема енергоощадного отримання біодизельного палива.

На рис. 2.2. наведена принципова схема виробництва біодизелю за енергоощадної технології із використанням алгоритмів безвідходної технологій.

Для культивування мікроводоростей використовували поживне середовище Заррука, до складу якого входили макро- і мікроелементи у вигляді неорганічних солей (табл. 2.1). Такі збіднені щодо органічних компонентів поживні середовища характерні для фотосинтезуючих автотрофних організмів, для яких важливою умовою є надходження в культуральне середовище вуглекислого газу. Для постійного надходження в культуральне середовище вуглекислого газу використовували обладнання класичних біотехнологічних та мікробіологічних виробництв (скляні посудини закритого типу із штучним освітленням та підведеними аераторами, через які нагнітався вуглекислий газ (рис. 2.3) [24].

Таблиця 2.1

Основні живильні компоненти поживного середовища Заррука [25].

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

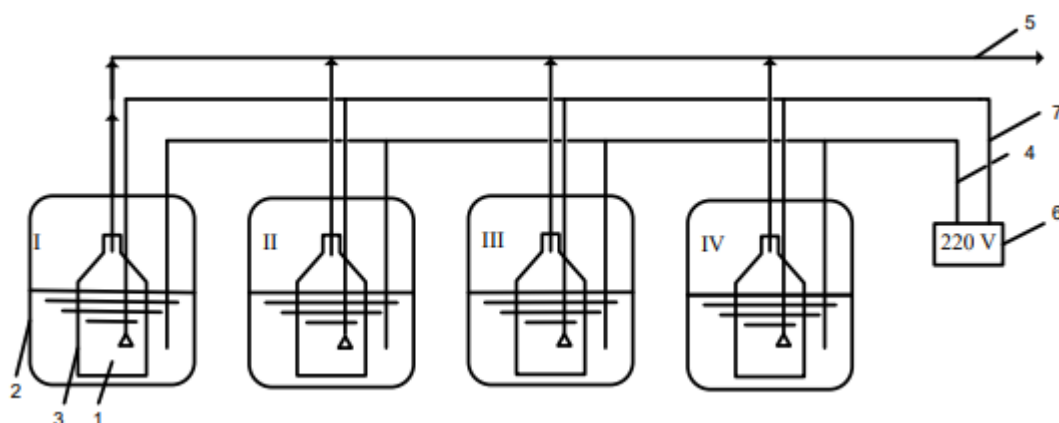


Рис. 2.3. Лабораторна установка вирощування водоростей за умов надходження у фітобіореактор різної концентрації вуглекислого газу та солей мікро- і макроелементів

З метою дослідження приросту біомаси популяції мікроводоростей використовували фотокольориметричний метод. Дослідження проводили із використанням кювети на 10 мл та синього світлофільтру (рис.2.4), як контроль використовували дистильовану воду [23].



Рис. 2.4. ФЕК-56

Не всі популяції мікрowodоростей є найкращими субстратами для виробництва біодизелю. Так, наприклад, у складі ламінарії японської (табл.2.2) вміст ліпідних компонентів незначний, однак в процесі метаболічних перетворень водорослевий крохмаль та інші інгредієнти перетворюються ліпідні структури, які в подальшому можуть перетворюватися у триацилгліцероли.

Таблиця 2.2

Хімічний склад *Laminaria japonica* [30].

Речовина	Вміст у% на суху масу
Альгінова кислота	15,0–32,6
Азотисті речовини	6,8–15,5
Водорослевий крохмаль (ламінаран)	8,5–19,6
Целюлоза (альгулеза)	5,7–6,2
Манніт	3,7–28,9
Пентозани	6,5–10,6
Розчинні в ефірі речовини	0,3–1,6

Однак, існують мікрowodорослі-ліпіди (батріококус браунії), які здатні нагромаджувати в своїх клітинах до 70-80% жирів, це звана “зелена нафта” (рис.2.5).

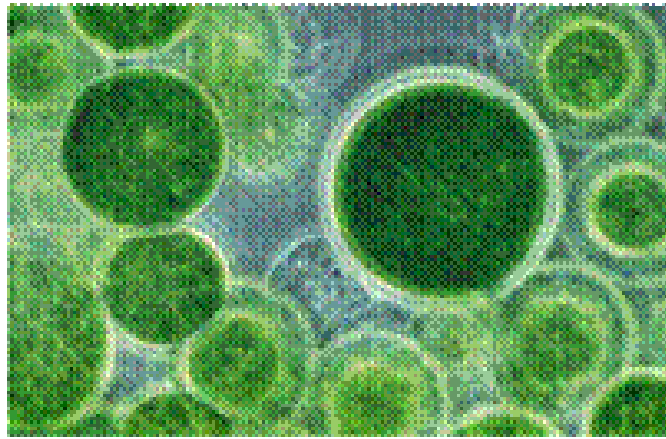


Рис.2.5. Батріококус браунії – майбутнє для біопалива III покоління

У цієї водорості колонії слизисті, шароподібні, гроздеподібно округлені, дольчасті прості чи складаються з радіально відходячих частин слоєвища, багатоклітинні, з потужним накопиченням клітин на периферії, кожна з яких повністю чи частково занурена у в'язку колоніальну слиз, чи сидить у бокалоподібних слизистих утвореннях (чохликах). Центральна частина колонії складається з безструктурного слизу, який утворюється в результаті інтенсивного ослизення залишків оболонок клітин. Клітини еліпсоїдні, повністю чи на 3/4 довжини занурені у слиз.

Окрім маленьких крохмальних зерен, які розсіяні у стромі хлоропласту, у цитоплазмі накопичуються краплі олії та волютину (резерву поживних речовин). Оболонка тонка, гладенька, безкольорова. Оболонки материнських клітин в наслідок ряду послідовних ділень утворюють систему вкладених один в один бокальців, які занурені в безструктурну слиз, інколи просочену безкольоровою чи жовтою олією. В останньому випадку колонія має жовто-червоний колір. Краплі олії можуть досягати 50% об'єму клітини, що дає можливість отримувати велику кількість олії.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Стан та перспектива одержання біодизелю як поновлювального джерела енергії

На сучасному розвитку економіки як в нашій країні, так й в цілому світі інтенсивно розробляються технології щодо використання відновлювальних або поновлювальних джерел енергії. До таких джерел енергії відносяться джерела, які на відміну від викопних джерел, в основному вугілля та вуглеводнів, можуть відновлюватися та використовуватися упродовж тривалого часу. На рис. 3.1. наведені основні альтернативні (поновлювальні) джерела енергії.

Вагоме місце у загальному балансі поновлювальних джерел енергії посідає біопаливо, яке з року в рік збільшує свою частку. Якщо дослідити динаміку зростання біоенергетики впродовж 25 років, то можна спостерігати стрімку зростання даного виду відновлювальної біоенергетики (табл. 3.1). Так, упродовж 25 років, починаючи із 2005 по 2030 роки рівень виробництва біопалива зросло у 7,1 рази.

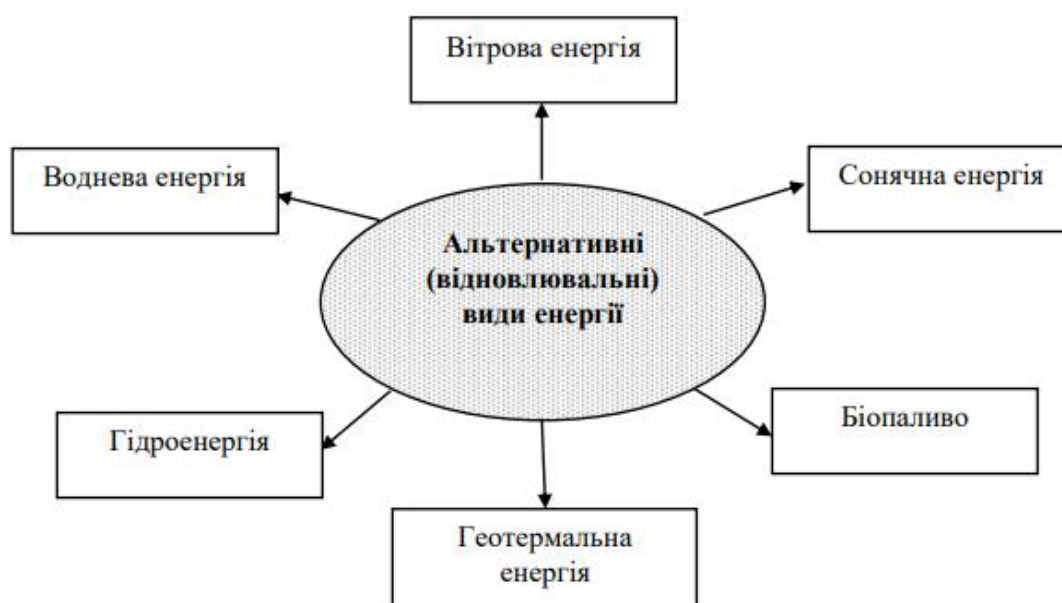


Рис. 3.1. Основні поновлювальні джерела енергії, які використовуються в промислових масштабах

Таблиця 3.1

Динаміка виробництва поновлювальних джерел енергії [33].

Напрями освоєння ВДЕ	Рівень розвитку ВДЕ по роках			
	2005 р.	2010 р.	2020 р.	2030 р.
Позабалансові джерела енергії, всього	13,85	15,96	18,5	22,2
У тому числі шахтний метан	0,05	0,96	2,8	5,8
Відновлювальні джерела енергії, всього	1,661	3,842	12,054	35,53
У тому числі: Біоенергетика	1,3	2,7	6,3	9,2
Сонячна енергетика	0,003	0,032	0,284	1,1
Мала гідроенергетика	0,12	0,52	0,85	1,13
Геотермальна енергетика	0,02	0,08	0,19	0,7
Вітроенергетика	0,018	0,21	0,53	0,7
Енергія довкілля	0,2	0,3	3,9	22,7
Усього	15,51	19,83	30,55	57,73

Швидке зростання виробництва відновлювальних джерел енергії зумовлено вдосконаленням технологій виробництва біогазу, біоетанолу, біодизелю, Гідроген тощо. Перспективним біопаливом є виробництво біодизелю, який активно використовується та виробляється країнами світу та ЄС (рис. 3.2).

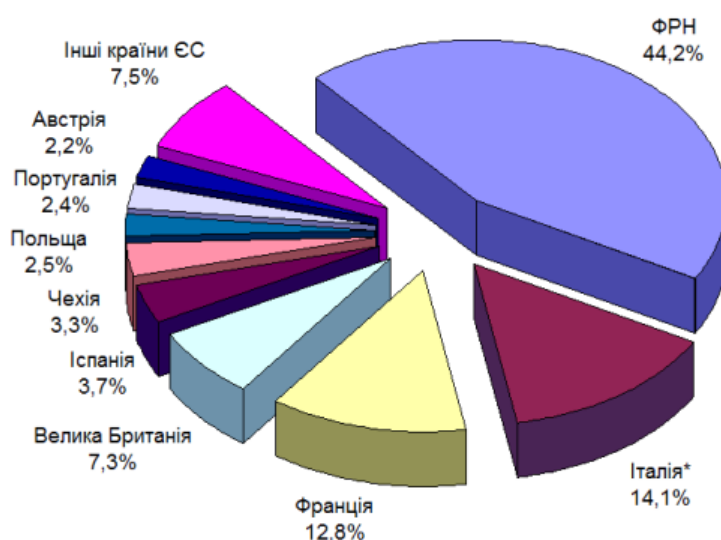


Рис. 3.2. Виробництво біодизелю країнами ЄС [35].

Сировиною для виробництва біопалива є біомаса, шляхом переробки якої із використання певних технологічних прийомів (термо-хімічних, фізико-хімічних та біотехнологічних) одержують різні види біопалива (рис. 3.3).

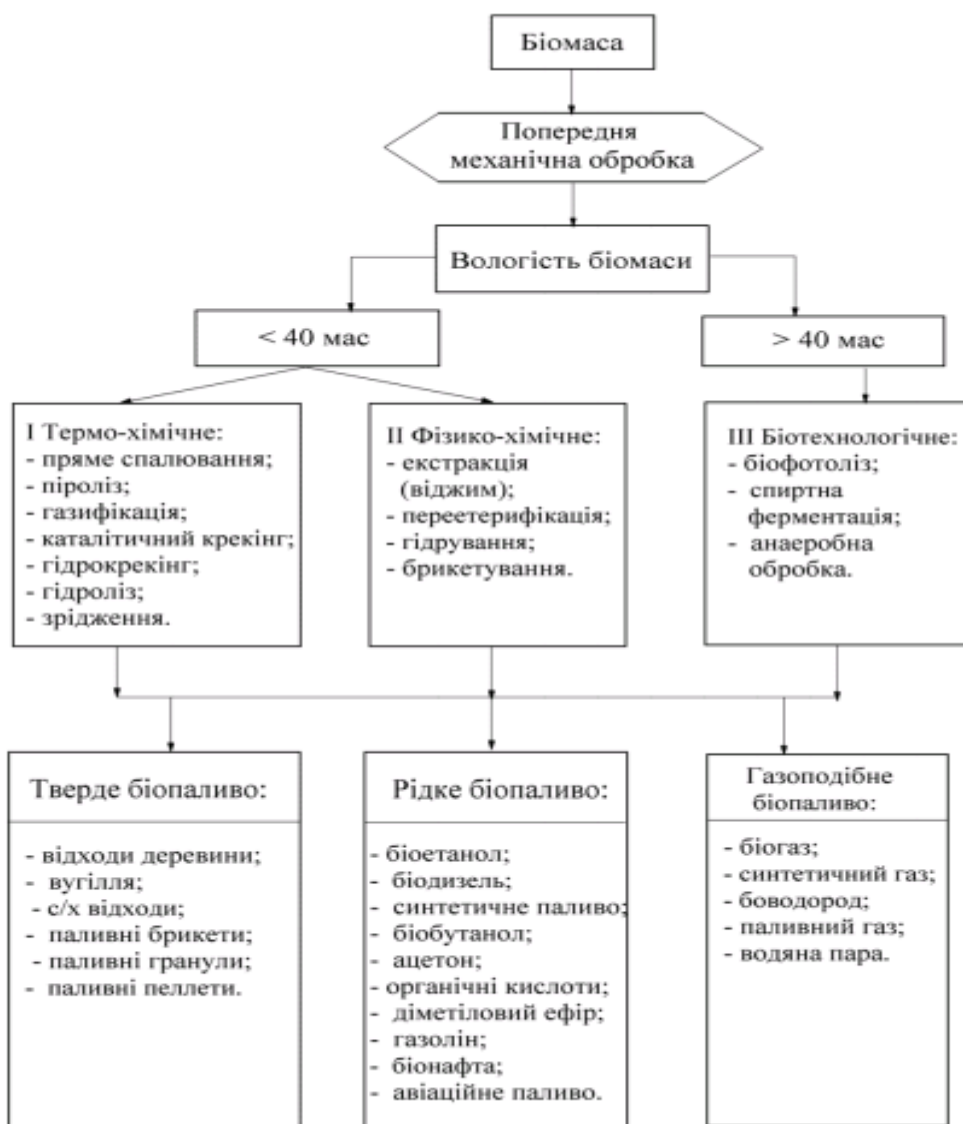


Рис. 3.3. Типи біопалива залежно від складу біомаси та технологічних прийомів переробки

Важливим і перспективним технологічним прийомом переробки органічних субстратів є біологічний (біотехнологічний) метод, який заснований на використанні популяцій мікроорганізмів для деградації та біотрансформації біомаси. Залежно від виду субстрату, який піддається біоконверсії одержують паливо I (відходи тваринництва та переробної

промисловості), II (субстрати рослинного походження) та III (мікрободорості) покоління (рис.3.4).



Рис. 3.4. Субстрати для виробництва біопалива I-III покоління

Біодизель, як один із важливих поновлювальних джерел енергії також можна одержувати із різних субстратів, які відносяться до I, II та III покоління (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Характеристика біодизелю, який отриманий на субстратах I, II та III покоління

Важливе значення в процесі одержання біопалива є запровадження маловідходних та безвідходних технологій, який охоплює повний цикл від одержання базового субстрату (олії), синтезу біопалива та повного використання відходів у різних галузях господарської діяльності (рис. 3.6).

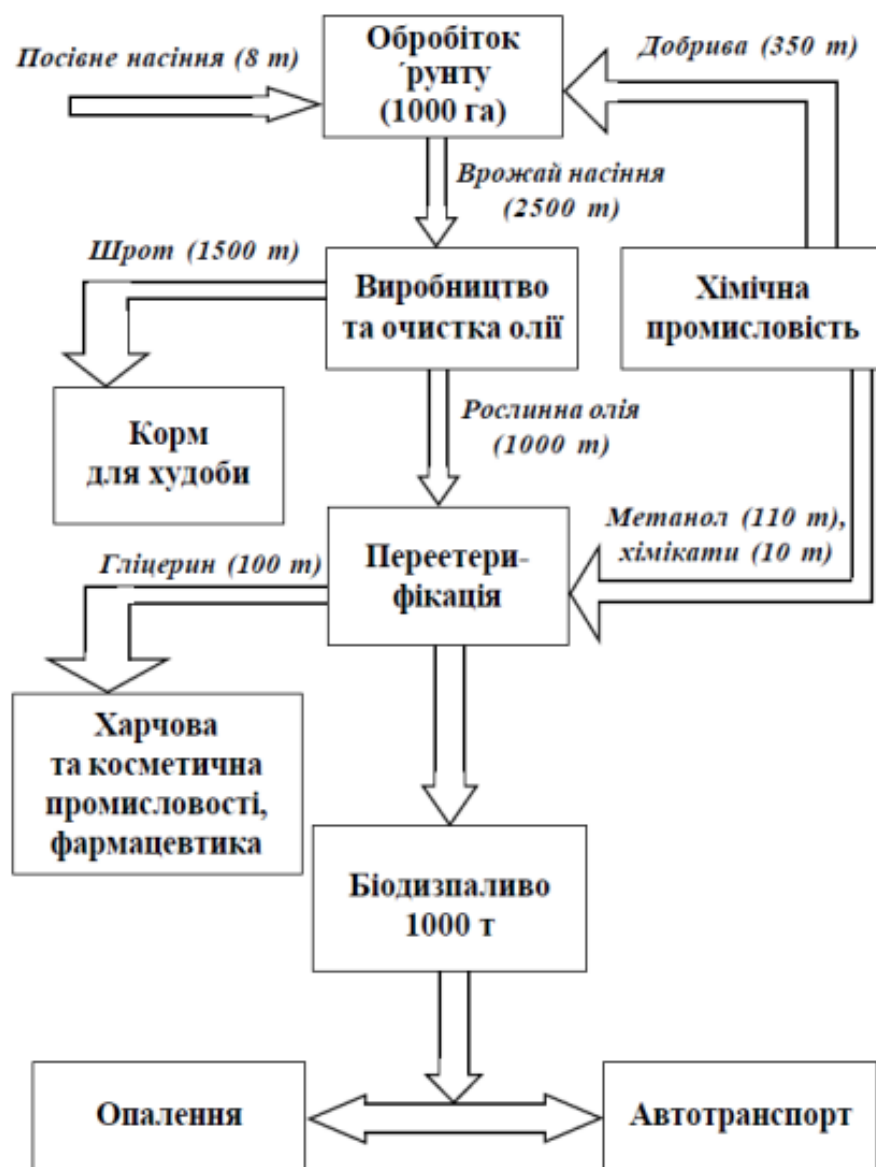


Рис. 3.6. Безвідходна технологія одержання біодизелю за використанням як базового субстрату ріпакову олію

3.2. Обґрунтування використання мікроводоростей для одержання біодизелю та особливості технологічного процесу

В сучасних умовах, постійно вдосконалюються технології щодо виробництва відновлювальних джерел енергії, зокрема біодизелю. Як зазначалось вище, важлива роль в економічній ефективності виробництва біопалива є вибір базового органічного субстрату (біомаси) для його переробки в цінцевий продукт. За типом субстрату все отримане біопаливо поділяють на чотири покоління. Особливої уваги, на даний час, приділяють виробництва біопалива III покоління, де як субстрат використовують мікроводорості.

Мікроводорості як автотрофні організми невибагливі до умов культивування, однак володіють високими продуктивними якостями щодо синтезу органічних сполук, зокрема ліпідів як базового компоненту для одержання біодизелю. Як видно із табл. 3.2, вихід олії в літрах в перерахунку на га в мікроводоростів (реальні досягнуті показники) у 2,9 рази перевищує вихід олії з пальм та у 15,7 рази вихід олії із ріпаку, який вирощується в умовах нашої країни.

Таблиця 3.2.

Річна динаміка виходу олії із олійних сільськогосподарських культур та мікроводоростей, л/га [36].

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
Мікроводорості (досягнуті показники)	17 300
Мікроводорості (теоретичні лабораторні показники)	
до 30 % мас. олії в біомасі	46 800...58 700
до 70 % мас. олії в біомасі	140 000...158 000

Окрім того, вміст олії у % в біомасі мікроводоростей у перерахунку на суху масу перевищує основні олійні культури у 1,5-3,9 рази, із одночасним зменшенням використання сільськогосподарських угідь відповідно у 20-180 разів (табл. 3.3). Річна теоретична продуктивність одержаного біодизелю за використанням олії біомаси водоростей перевищувала у 25,5 та 215,1 рази відповідні показники одержаного біодизелю із олій перерахованих вище олійних культур. Враховуючи наведене вище, є обґрунтована доцільність щодо розробки технологій одержання біопалива III покоління.

Таблиця 3.3

Річна динаміка одержання біодизелю із олії одержаної із сільськогосподарських рослин та водоростей [29].

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

Біоконверсія мікроводоростей проходить за наступною класичною схемою (рис. 3.7):

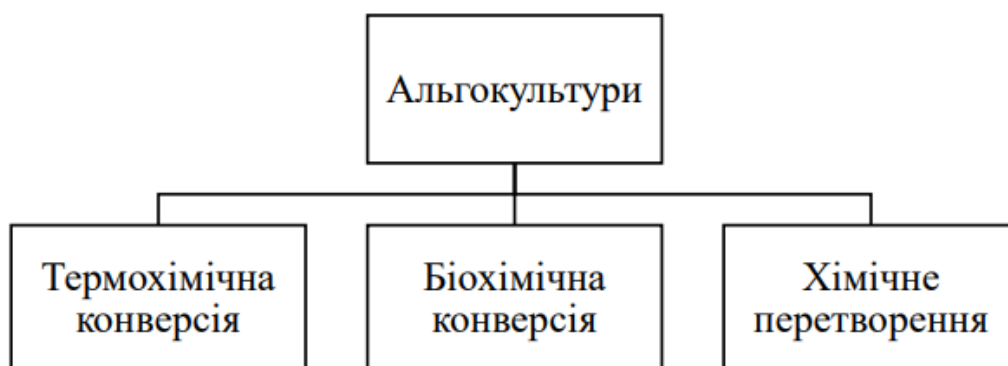


Рис. 3.7. Технологічні аспекти одержання біопалива III покоління

Принципова технологічна схема виробництва біодизелю III покоління наведена на рис. 3.8

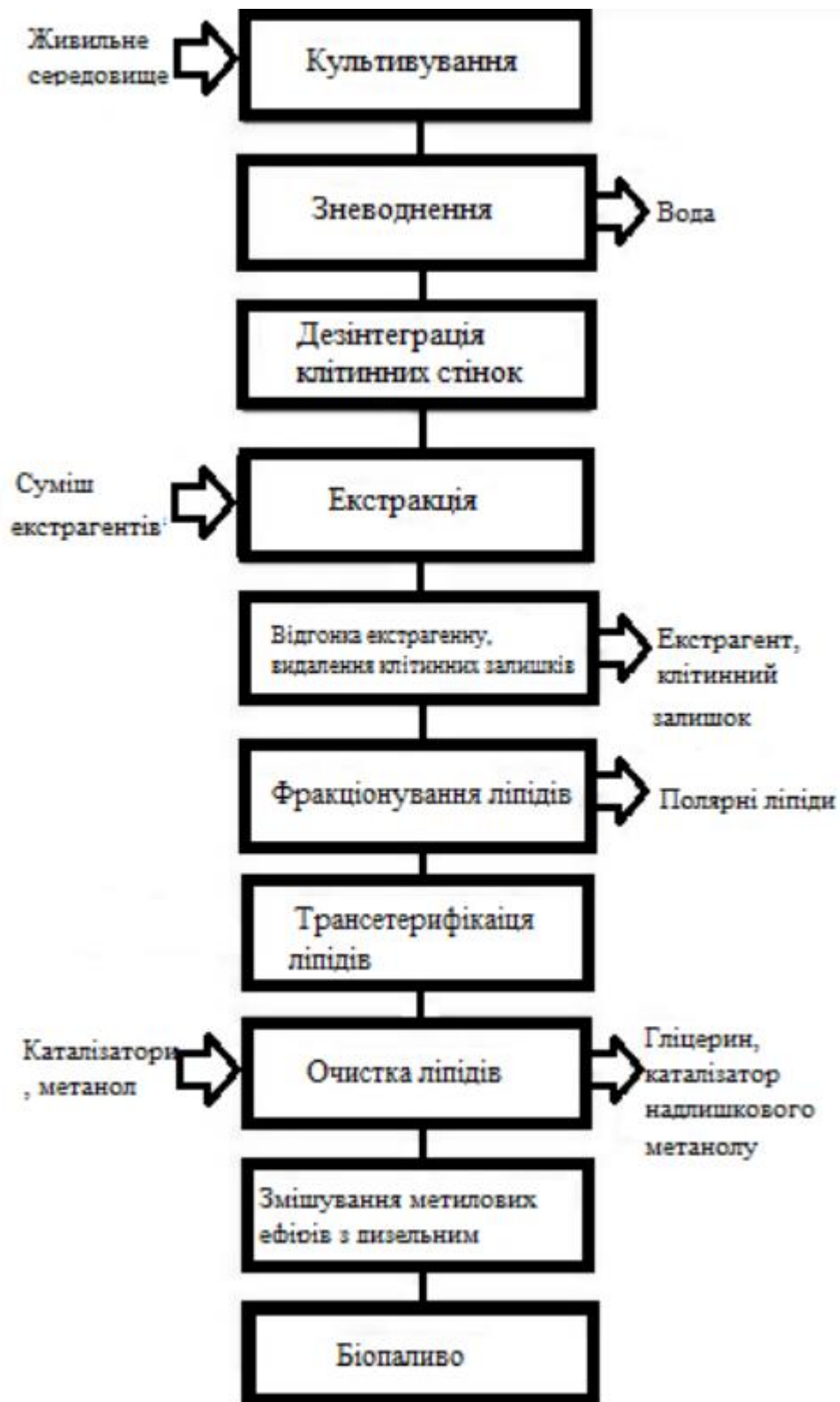


Рис. 3.8. Принципова технологічна схема одержання біопалива III покоління на прикладі технології одержання біодизелю [27].

На початковому етапі в технологічному процесі одержання біопалива III покоління проводять вирощування мікроводоростей. Весь технологічний процес наведений на блок-схемі (рис. 3.9):

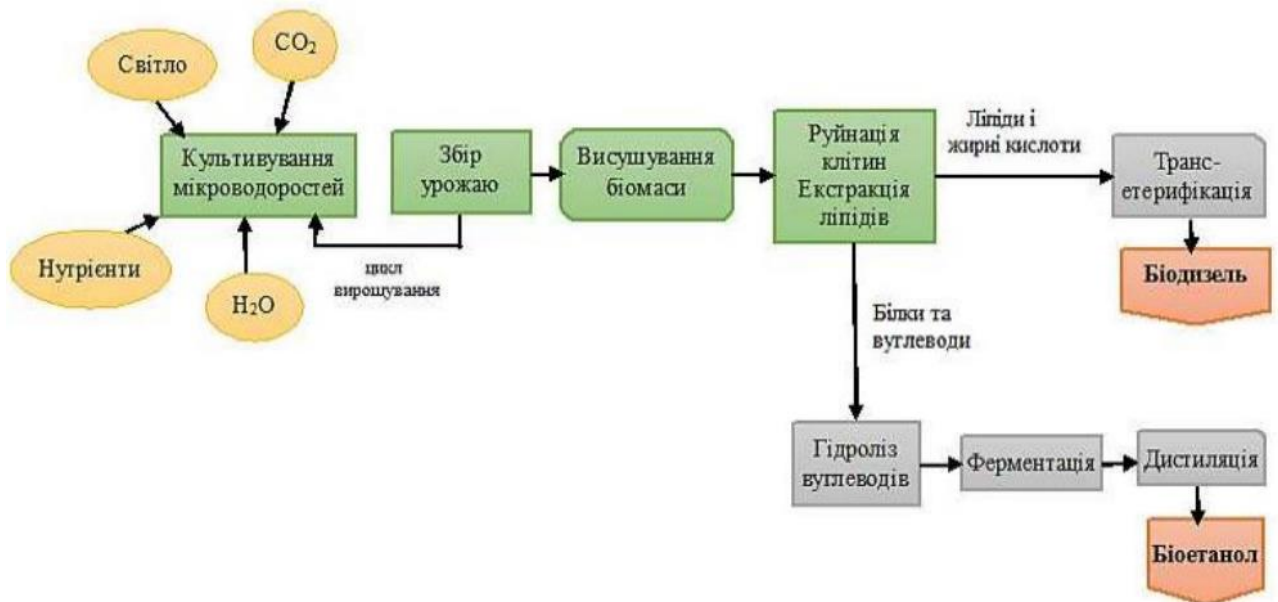


Рис. 3.9. Блок-схема технології одержання біопалива третього покоління [31].

Вирощування мікроводоростей проводять як у відкритих та закритих системах, так й у фотобіореакторах різного типу (рис. 3.10). Суть культивування популяцій мікроводоростей зводиться до дотримання умов вирощування (забезпечення достатнього освітлення, регулювання температури, дотримання оптимального рН середовища та вмісту біогенних елементів).





Рис. 3.10. Типи систем вирощування мікроводоростей [30].

Відкриті системи вирощування водоростей мають свої недоліки, а саме, вони залежать від кліматичних умов, характеризуються сезонністю, є постійна необхідність контролювати температурний режим, уміст CO_2 та освітлення, окрім того популяція мікроводоростей може контамінуватися мікроорганізмів довкілля.

Серед перерахованих систем вирощування мікроводоростей, використання фотобіореактора є найбільш перспективним, що забезпечує [26]:

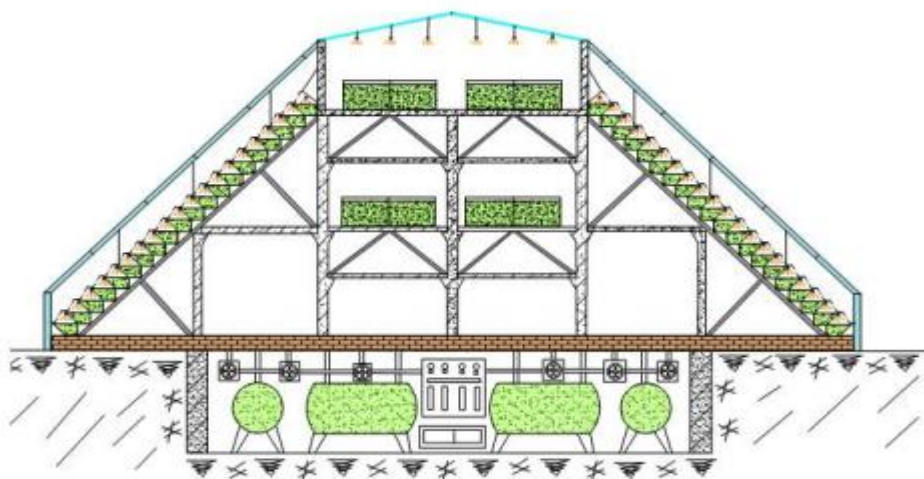
1. можливість застосування автоматизованих систем управління технологічними процесами;
2. максимальна ефективність використання освітлення і, як наслідок, значно більш висока цілодобова продуктивність;

3. економія простору, модульне і вертикальне розташування фітобіореактор;

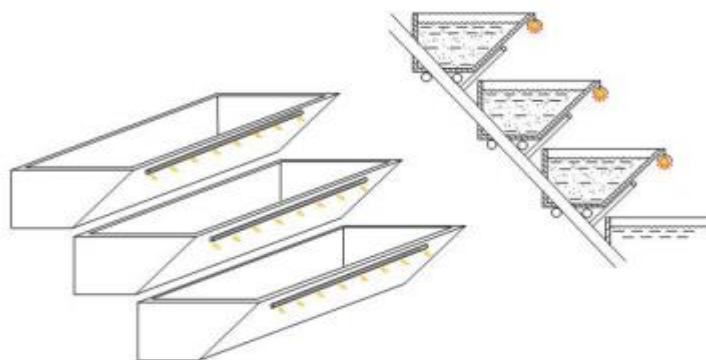
4. можливість створення конфігурацій будь-якого розміру;

5. зменшення потреби в робочій силі та ліквідація проблем із завантаженням розвантаженням [26].

Використання фітобіореакторів для культивування мікроводоростів забезпечує одержання екологічно безпечної олії, а також ряд побічних продуктів, які можна використати для живлення тварин і харчування людей, біологічно активні речовини для фармацевтичної галузі та косметики і тверде біопаливо. Схема будови фітобіореактора для культивування мікроводоростей у промислових масштабах наведена на рис. 3.11.



А



Б

Рис. 3.11. Схема будови фітобіореактора для культивування мікроводоростей (А) та біореакторні ємкості (Б)

Враховуючи, опрацьований вище матеріал, ми наводимо по-етапну схему технологічного процесу виробництва біодизелю та інших компонентів біопалива III покоління на рис. 3.12.

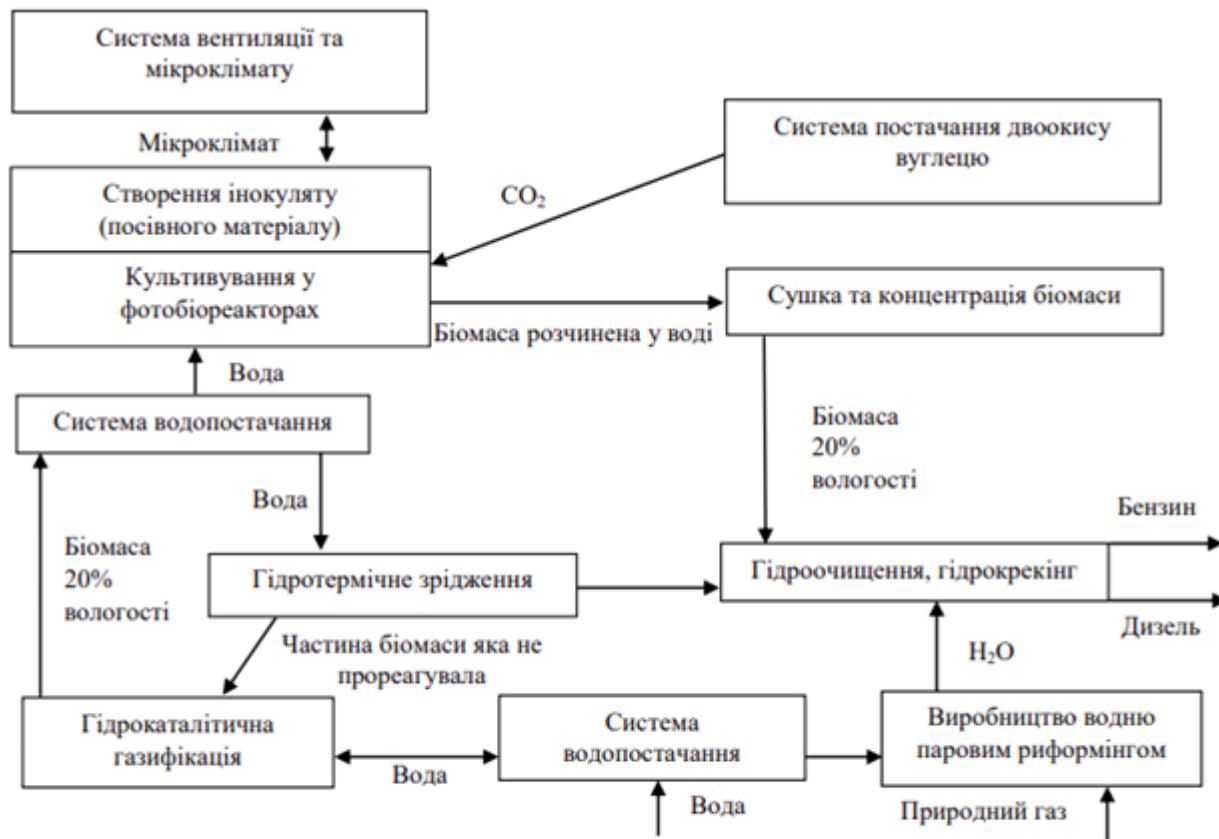


Рис. 3.12. Концептуальна схема технології отримання біодизелю із мікроводоростей

3.3. Оптимізація технологічної ланки трансестерифікації в процесі виробництва біопалива III покоління

Оптимізацію технологічного процесу виробництва біопалива III покоління можна здійснювати на стадії трансестерифікації. Оскільки, клітинна оболонка мікродоростей є доволі проникна та не стійкою, то процес трансестерифікації можна проводити безпосередньо на біомасі водоростей, мінаючи процес висушування біомаси та екстракцію ліпідів. Такий підхід є економічно доцільним, він суттєво здешевлює кінцевий продукт – біодизель.

Враховуючи сказане вище, наші дослідження були спрямовані на оптимізацію процесу трансестерифікації, яка відбувалася безпосередньо на біомасі водоростей шляхом використання різних каталізаторів лужної та кислої природи (KOH і H_2SO_4). За умов експерименту, в лабораторних умовах проводили процес трансестерифікації *in situ* за участі вищезгаданих каталізаторів у концентрації відповідно 6,0, 8,0, 10,0 та 12,0 моль упродовж 18 годин. Каталізатори використовували в кількості 0,1 мг в перерахунку на 1 мл олії.

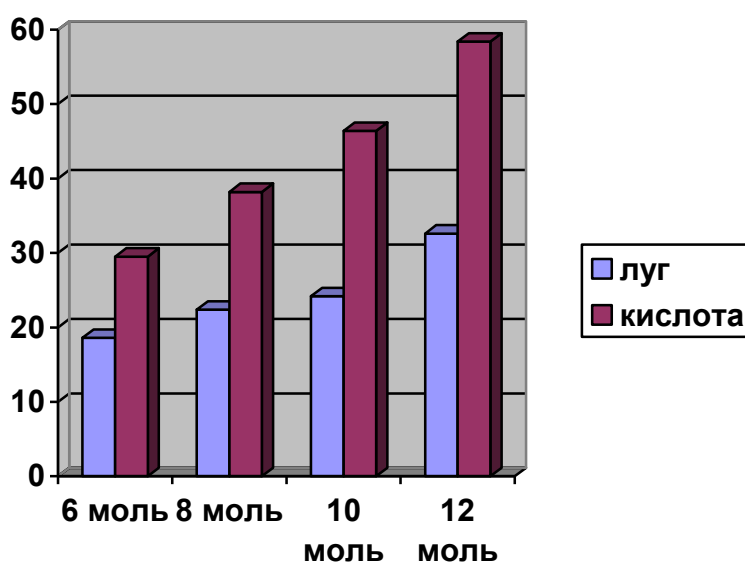


Рис. 3.13. Динаміка одержання складних ефірів вищих жирних кислот та метанола залежно від концентрації та виду каталізатора

Як видно із даних діаграми (рис. 3.13), максимальну кількість естерів (58,4 %) було отримано за використанням як каталізатора сульфатної кислоти у концентрації 12 моль, що на 25,8% кількість одержаних естерів, коли використовували КОН як каталізатор. За концентрації сульфатної кислоти 6,0, 8,0 та 10,0 моль трансестерифікація відповідно була на рівні 29,5, 38,2 та 46,4% і відповідно на 10,9, 15,8 та 22,2% переважали відповідні показники щодо одержання естерів вищих жирних кислот та метанолу при використанні КОН як каталізатора.

Таким чином, із результатів експериментальних досліджень випливає, що більш ефективним в процесі трансестерифікації біомаси мікроводоростей є кислий каталізатор – сульфатна кислота порівняно із гідроксидом калію. Сульфатна кислота, очевидно, поряд із каталітичними властивостями, краще забезпечує руйнування клітинних стінок мікроводоростей, що забезпечує кращий контакт між реагуючими агентами – жирними кислотами та метиловим спиртом, що забезпечує кращу біоконверсію метилових естерів високомолекулярних жирних кислот.

Збільшення кількості сульфатної кислоти як каталізатора (каталізатор + метиловий спирт + вищі жирні кислоти) до 0,2 мг в перерахунку на 1 мл олії забезпечило підвищення на 16,2% одержання метилових естерів, що забезпечило вихід останніх на рівні 74,6% із біомаси мікроводоростей.

Одержані результати дозволяють стверджувати, що для отримання високого виходу естерів необхідна присутність в реакційній суміші каталізатора, що прискорюватиме процес етерифікації. Відповідно вихід метилових ефірів жирних кислот напряму залежить від наступних факторів:

- час контакту реакційної суміші та температури;
- співвідношення між реагуючими речовинами (моль/моль);
- наявність каталізаторів та їх кількість, мг;
- вміст вологи у вихідній сировині, %.

На рис. 3.14, наведена технологічна лінія щодо виробництва метилових естерів високомолекулярних жирних кислот, де саме відбувається процес трансестерифікації біомаси мікрроводоростей. Одержаний в такий спосіб біодизель III покоління відповідає вимогам стандарту ЄС на біодизель EN 14214:2003 [28] (табл. 3.4).

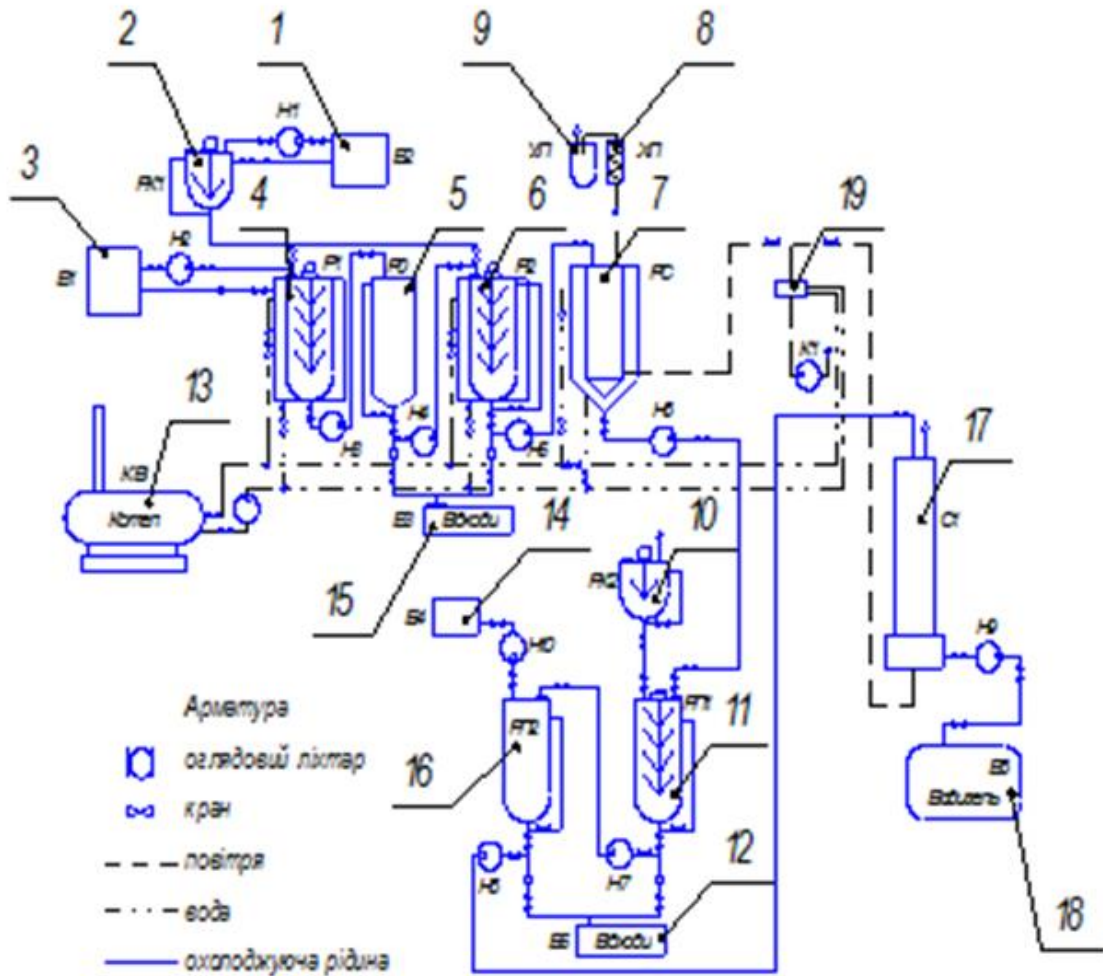


Рис. 3.14. Технологічна схема лінії виробництва метилових ефірів жирних кислот [3].

Н1-Н10 - насос; К1 - компресор; Б1-Б6 - місткість; РК1-РК2 - реактор змішувач; Р1-Р2 т реактор; РО - реактор відстійник; РС - реактор відбору метанолу; С1 - сушка; РП1-РП2 - реактор промивання; КВ1 – котел водогрійний; Т1 - теплообмінник; ХЛ - холодильник; УЛ - уловлювач; 1 - містить метанол; 2 – реактор змішувач; 3 - рослинну олію; 12 - відходи; 14 - воду; 15 - гліцерин сирій; 18 – біодизель

Стандарт ЄС на біодизель EN 14214:2003 [28]

Параметр	Значення		Метод тестування
	мін.	макс.	
Цетанове число	51		EN ISO 5165
Масова частка ефіру, %	96,5		EN 14103
Густина за температури 15 °С, кг/м ³	860	900	EN ISO 3675 і 12185
В'язкість за температури 40 °С, мм ² /с	3,5	5	EN ISO 3104
Температура спалаху, °С	120		ISO / CD 3679
Масова концентрація сірки, мг/кг		10	EN ISO 20846 і 20884
Вуглецеві залишки (у 10 % залишку), %		0,3	EN ISO 10370
Масова частка сульфурованої золи, %		0,02	ISO 3987
Масова концентрація води, мг/кг		500	EN ISO 12937
Масова концентрація механічних домішок, мг/кг		24	EN 12662
Корозія мідної пластинки (3 год за 50 °С)	Клас 1		EN ISO 2160
Стабільність до окислення за температури 110 °С, год	6		EN 14112
Кислотне число, мг КОН/г		0,5	EN 14104
Йодне число		120	EN 14111
Масова частка, %			
метилового ефіру ліноленової кислоти		12	EN 14103
поліненасичених метилових ефірів		1	
метанолу		0,2	EN 14110
моногліцеридів		0,8	EN 14105
дигліцеридів		0,2	EN 14105
тригліцеридів		0,2	EN 14105
вільного гліцерину		0,02	EN 14105 і 14106
гліцерину, загалом		0,25	EN 14105
Масова концентрація лужних металів (Na + K), мг/кг		5	EN 14108 і 14109
Масова концентрація фосфору, мг/кг		10	EN 14107

3.4. Переваги та недоліки біопалива III покоління і перспективи виробництва біопалива в Україні

Мікродорості є перспективним субстратом для виробництва біопалива, в тому числі й біодизелю. Одержання біодизелю із мікродоростей має ряд переваг порівняно із іншими олієвмісними субстратами рослинного походження, а саме [30]:

виробляють в 15-100 разів більше олії з гектара, ніж ріпак, пальмова олія чи соя;
вони є непродовольчою біомасою, тому їх переробка на біопаливо не являє собою продовольчої загрози для країни;
ростуть в 20-30 разів швидше, ніж наземні рослини (деякі види можуть подвоювати свою масу декілька разів на добу);
відсутність твердої оболонки і практично лігніна, робить їх переробку на рідкі види палива більш технологічно простішою та ефективнішою, ніж переробка будь-якої наземної біомаси;
можуть вирощуватись в прісних, солоних водоймах, промислових стічних водах, що використовуються для їх очищення;
можна вирощувати в промислових масштабах в біореакторах та фотобіореакторах, що будуть освітлюватись штучними джерелами світла, або у відкритих ставках на непридатних для вирощування с/г культур землях, включаючи пустелі;
фотобіореактори вмонтовуються в технологічні лінії уже існуючих промислових підприємств (ТЕЦ, нафтохімічні виробництва, цементні заводи);
зменшують емісію CO ₂ (поглинають до 90% CO ₂ з виділенням кисню)
виробництво і використання біопалива не потребує зміни українського законодавства, на відміну від виробництва біоетанолу;
є джерелами олій, протеїнів, вуглеводів.

Поряд із перевагами, які характерні для мікробіодоростей як продуцентів біопалива III покоління є також певні недоліки щодо технологічних характеристик одержаного біопалива (табл.3.5).

Таблиця 3.5

Характеристика окремих технологічних показників одержання біопалива залежно від базового субстрату (сировини), яка піддається біоконверсії

Вид сировини	Переваги	Недоліки
Мікробіодорості	<ol style="list-style-type: none"> 1. Мають у складі жирні кислоти, що аналогічні рослинній олії. 2. Високий вміст ліпідів (до 85 % від сухою маси) 3. Швидкий ріст 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Більшість ліпідів дають низький вихід палива 2. Висока вартість процесу отримання олії
Бактерії, що продукують ліпіди	<ol style="list-style-type: none"> 1. Швидкий ріст 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Складний склад продукованих ліпідів
Дріжджі та ліпіди, що продукують ліпіди	<ol style="list-style-type: none"> 1. Високий вміст ліпідів 2. Швидкий ріст 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необхідність фільтрації та культивування 2. Складність технології екстракції ліпідів 3. Значні економічні затрати на культивування
Відпрацьовані олії	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низька собівартість 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Високий вміст жирних кислот 2. Складність трансформації в біопаливо

Існують водорості (генетично-модифіковані), які здатні подвоювати свою масу декілька разів на день. Більше того, в деяких видах кількість триацилгліцеролів (основи рослинної олії) складають більше половини їх маси. Стає очевидним, що не один вид з існуючих наземних рослин не здатен конкурувати з водоростями за ефективністю фотосинтезу, що лежить в основі урожайності, та за вмістом олій а, відповідно, енергії в них. Водорості у виробництві енергоносіїв перетворюють вуглекислий газ з проблеми у фактор прибутку.

Виробництво біопалива III покоління також започатковано на теренах України. Науковці та виробничники постійно розробляють та вдосконалюють технології культивування та вирощування мікроводоростей (сформована колекція водоростей – продуцентів біомаси (33 штами) та ліпідів (7 штамів) [32]), удосконалюють безпосередньо технології щодо одержання олії із висушеної біомаси водоростей та її подальшої переробки в біодизельне паливо за використанням біотехнологічних та термо-хімічним технологічних процесів. Успішно використовуються та вдосконалюються фітобіореактори для виробництва біомаси мікроводоростей на промисловій основі за безвідходних технологій.

Провідними науковцями НАНУ та науково-дослідних інститутів розроблена концепція та алгоритм одержання біопалива III покоління в Україні (рис.3.15). Щодо перспектив виробництва біопалива III покоління в Україні, то вони наведені в табл. 3.6.



Рис.3.15. Алгоритм одержання біопалива III покоління за класичних технологій, які застосовуються в Україні

Перспективи виробництва біопалива в Україні

Перспектива	Характеристика
Економічна	Виробництво біопалива може створити нові робочі місця, залучити інвестиції, сприяти розвитку регіонів та збільшити експортні потенціали країни. Це може мати позитивний вплив на економіку України.
Екологічна	Використання біопалива може допомогти зменшити залежність від традиційних джерел енергії та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище
Підвищення енергетичної ефективності	Удосконалення технологій виробництва біопалива, включаючи процеси конвертації сировини та оптимізацію енергетичних втрат, може покращити ефективність виробництва та зробити його більш конкурентоспроможним.
Залучення інвестицій	Привабливі умови для інвестицій у сферу виробництва біопалива можуть сприяти розвитку цього сектору. Іноземні інвестори можуть бачити потенціал України як виробника біопалива та вкладати кошти в модернізацію та розширення виробництва.
Розвиток інноваційних технологій	Впровадження нових технологій у виробництво біопалива, таких як процеси газифікації, гідролізу та ферментації, може збільшити виходи та покращити якість продукту
Енергетична незалежність	Розвиток виробництва біопалива дозволить Україні зменшити залежність від імпортованого палива, забезпечити енергетичну незалежність та створити нові робочі місця в сільському господарстві та промисловості.
Посилення сталості	Використання біопалива може допомогти зменшити викиди парникових газів та покращити стан довкілля. Це сприятиме виконанню зобов'язань України щодо зменшення викидів парникових газів, а також покращить якість повітря та здоров'я населення
Використання відходів та непридатних матеріалів	Виробництво біопалива може бути засноване на використанні сільськогосподарських відходів, жирів, відпрацьованих олій та інших непридатних матеріалів. Це сприяє використанню вторинних ресурсів і зменшенню відходів
Розвиток сільського господарства	Виробництво біопалива базується на використанні сільськогосподарських культур як сировини. Це сприяє розвитку сільського господарства, збільшенню площ під посівами та збільшенню прибутковості для сільськогосподарських виробників
Співпраця з іншими країнами	Україна може розвивати співпрацю з іншими країнами, особливо з тими, які мають високу потребу в біопаливі або технологіях його виробництва. Це може створити нові можливості для експорту та технологічного обміну.

ВИСНОВКИ

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

2. Технологія одержання біодизелю із біомаси мікроводоростей науковцями та практиками розглядається як перспективна безвідходна технологія. Мікроводорості не вибагливі до умов культивування, вони на порядки продуктивніші продуценти ліпідів порівняно із продуцентами рослинної олії.

3. Використання фітобіореакторів для культивування мікроводоростей забезпечує одержання екологічно безпечної олії, а також ряд побічних продуктів, які широко можна використати в різних галузях економіки

4. Для одержання біопалива III покоління є реальна можливість використовувати маловідходні та безвідходні технології, які охоплюють повний замкнутий цикл щодо одержання біодизельного палива та використання усіх відходів виробництва.

5. Шляхом експериментальних досліджень було встановлено, що більш ефективним в процесі трансестерифікації біомаси мікроводоростей є кислий каталізатор – сульфатна кислота порівняно із гідроксидом калію.

Збільшення кількості 12 молярної сульфатної кислоти як каталізатора до 0,2 мг в перерахунку на 1 мл олії впродовж 18 годин забезпечило підвищення на 16,2% одержання метилових естерів жирних кислот із готової продукції на рівні 74,6%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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
2. Бобров Є. А. Перспективи розвитку енергетики в контексті забезпечення енергетичної безпеки / Є. А. Бобров // 1-й Міжнародний науковопрактичний інтернет-сеінар «Екологічна освіта і наука для сталого розвитку». 2016. С. 28-34.
3. Матвєєва 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.
4. Климчук О. В. Стратегічні передумови збільшення використання біопалив у структурі енергоспоживання України. Глобальні та національні проблеми економіки. 2016. № 9. С. 128–133.
5. Синельников О.Д. Забезпечення екологічної безпеки водосховищ шляхом використання мікроводоростей для виробництва енергоносіїв: дис... канд. тех. наук: 21.06.01. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2016. 144 с.
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. 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
8. 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.

9. 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/

10. Уминський С. М., Чучуй В. П., Інютін С. В. Альтернативні палива з біомаси. Видавництво та друкарня «ТЕС», ISBN 978-617-7054-33-6, 2014 р. 375с.

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

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

13. 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.

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

15. Боднар О. І. Біотехнологічні перспективи використання мікрowodоростей: 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.

16. Організація і економіка використання біоресурсів: підручник: 2-ге видання, перероблене і доповнене. Вінниця: ТОВ «Друк», 2020. 372 с.

17. 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>

18. 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.

19. С. М. Уминський. Гідродинамічний апарат для виробництва біодизельного палива. Патент на корисну модель UA 127330U A 23K Заявлено 28.02.2018р. Опубл. 25.07.2018. Бюл .№14.

20. 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.

21. 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

22. Гаєва Л. І. Використання експлуатаційних матеріалів і економія паливно-енергетичних ресурсів. Навчальний посібник / Л. І. Гаєва, Ф. В. Козак, В. М. Мельник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. 272 с.

23. Журавель Д. П. Особливості використання олив біологічного походження для мобільної техніки. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти: зб. наук. праць / УВ МААО. Запоріжжя, 2014. Вип. 2. С. 157-165.

24. 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/

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

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

27. Daramola M. O, Zampraka A. Experimental study of the production of biomass by *Sacharomyces cerevisiae* in a fed batch fermentor. *African Journal of Biotechnology*. 2014. Vol. 7 (8), pp. 1107–1114.

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

29. Zhu L. D.; Hiltunen E. (2016) “Strategies for Lipid Production Improvement in Microalgae as a Biodiesel Feedstock.

30. 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>

31. Strategy of sustainable development of Ukraine until 2030. (2019). Ukraine presidential decree No. 722/2019

32. 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>

33. Павленко М.Ю. Аналіз технологій виробництва дизельного біопалива / М.Ю. Павленко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редкол.: Д.О. Мельничук (відп. ред.) та ін. К. 2014. Вип 185, ч.1. С. 161-166.

34. Сербій В. Обладнання для виробництва поновлювальних джерел енергії. Техніка і технології АПК. 2013. № 6(45). С.36-37.

35. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel O.S. Energy efficiency and new and renewable sources of energy / *Heat power*, 2014, N 6, P. 14-21

36. 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

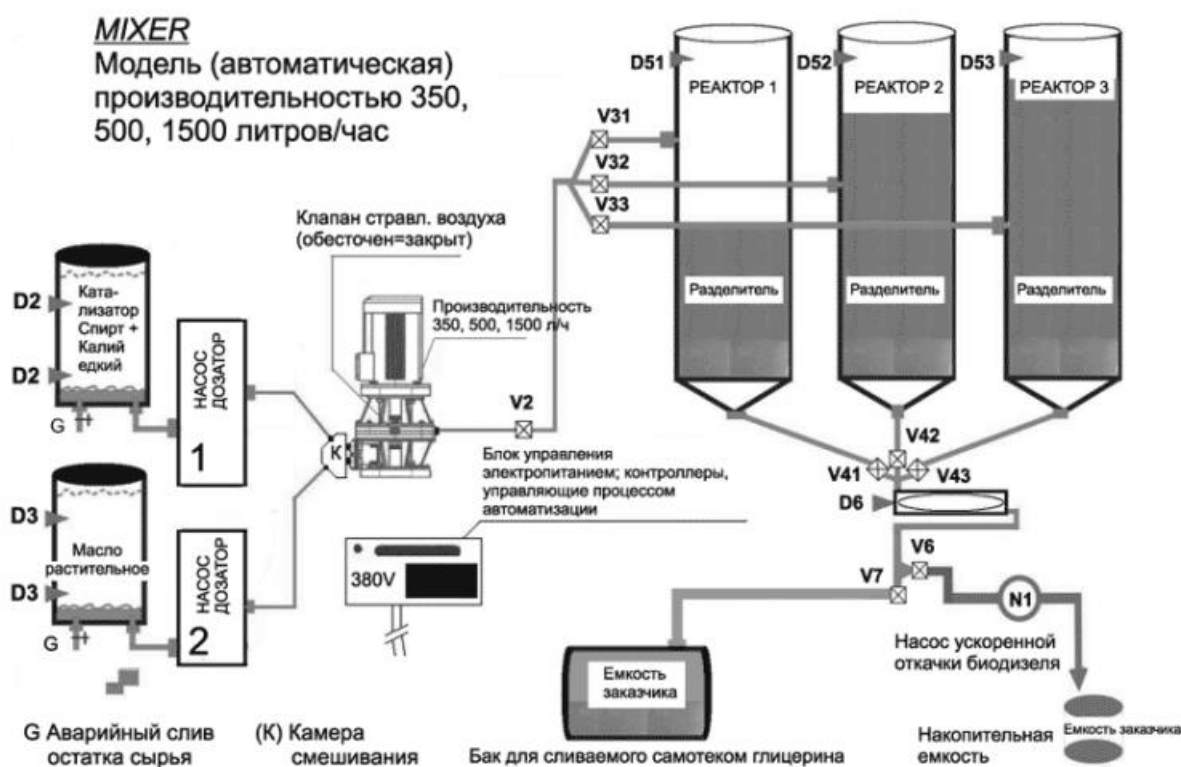
ДОДАТКИ

Додаток А

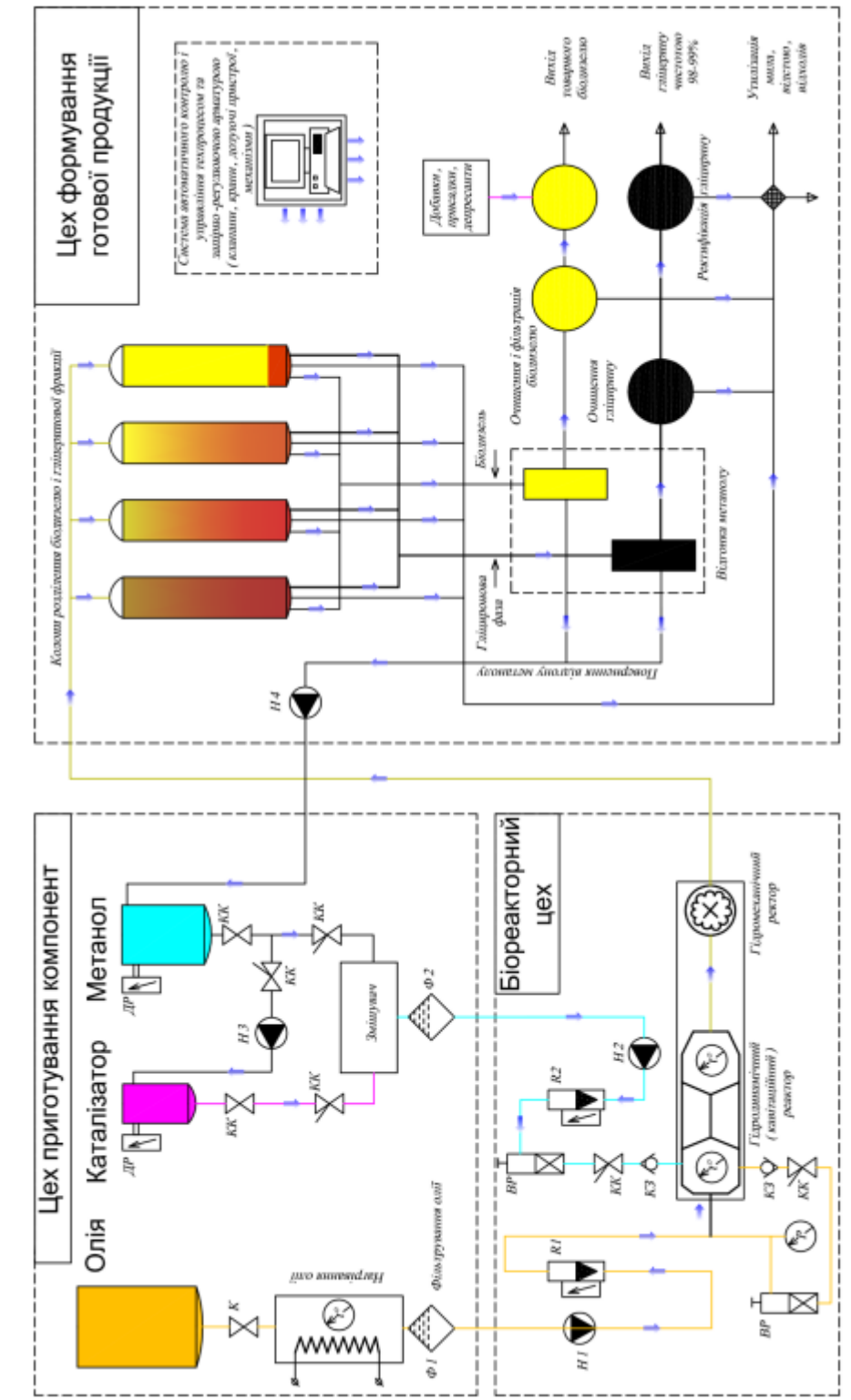


Субстрати, що визначають покоління біопалива

Додаток Б



Принципова схема біодизельної установки MIXER



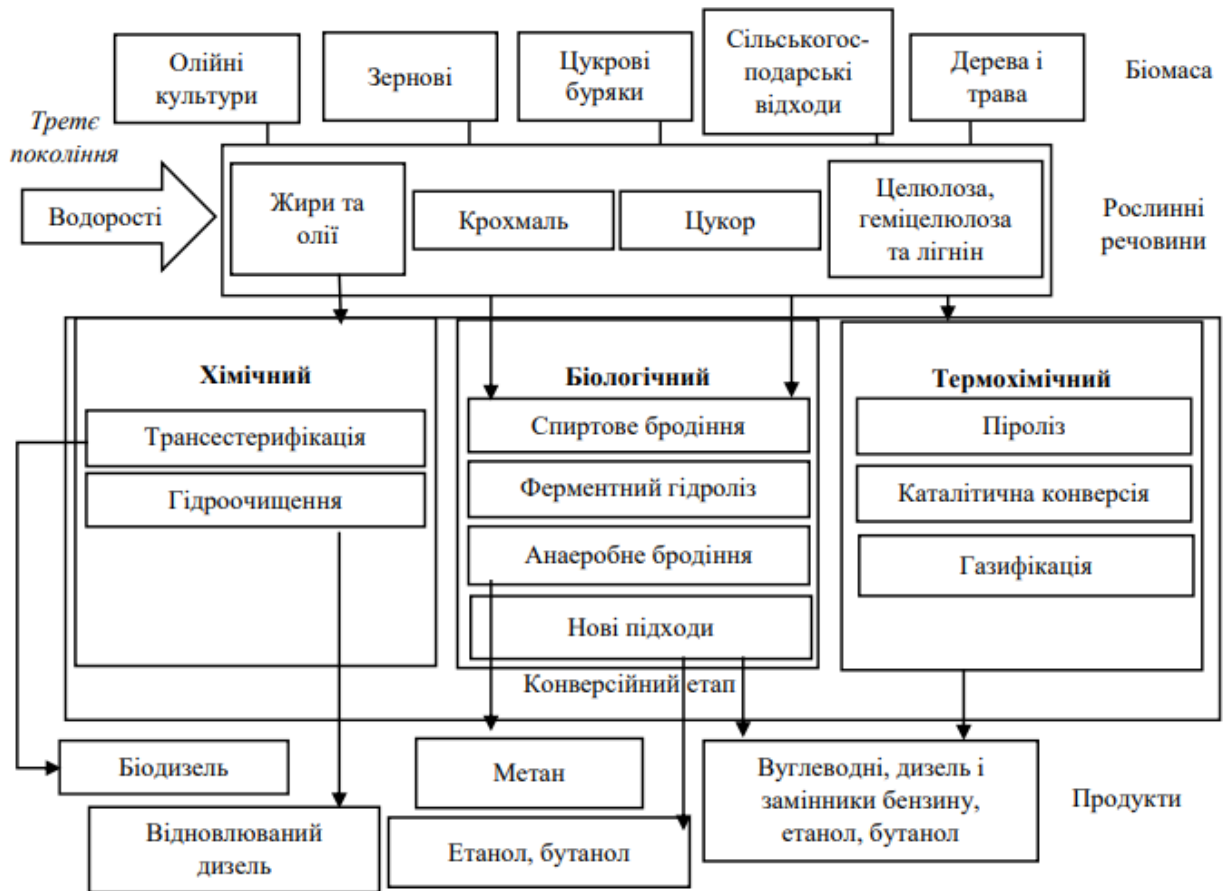
К - крани шарові не керовані; КК - крани шарові керовані; КЗ - клапани зворотні; ВР - вентилі регулюючі; Ф - фільтри; Н - масоми; R - витратоміри (ротометри); Р - датчики тиску, t° - датчики температури; ДР - датчики рівня

Принципова технологічна схема одержання біодизелю за циклічної технології із використанням каталізатора

Переваги та недоліки викопного палива та біопалива

Викопне паливо	
Переваги	Недоліки
<i>Створена інфраструктура:</i> багатовікові практичні знання про ці ресурси та інструменти їх використання на щоденній основі у заздалегідь визначених місцях	<i>Непоновлюване джерело енергії:</i> рано чи пізно вони вичерпаються, ціни почнуть зростати, а зрештою – зникнуть зовсім.
<i>Щільність енергії:</i> займають небагато місця, що робить їх дуже зручними для багатьох застосувань, зокрема транспортування.	<i>Вплив на навколишнє середовище:</i> від розливу нафти до глобального потепління та кислотних дощів
<i>Широкодоступність:</i> пропонують сировину для багатьох галузей промисловості	<i>Потребує повної модернізації при використанні в стандартних двигунах внутрішнього згоряння:</i> від двигуна до трансмісії.
	<i>Висока вартість сировини</i>
	<i>Забруднення поверхні на тривалий проміжок часу при розливі великої кількості</i>
	<i>Утворення кислотних дощів при спалюванні – результат високого вмісту сірки</i>

Біопаливо	
Переваги	Недоліки
<i>Поновлюване джерело енергії:</i> є похідним від зернових культур, які можуть бути зібрані щорічно, або у випадку водоростей – щомісячно	<i>Загроза для продуктів харчування:</i> обмежує кількість сировини, необхідної для виробництва біопалива
<i>Щільність енергії:</i> займають небагато місця, що робить їх дуже зручними для багатьох застосувань, зокрема транспортування.	<i>Великий ризик викидів парникових газів, що сприяють глобальному потеплінню</i>
<i>Можливе повне виключення з його складу сірки та азоту, що усуне основні компоненти кислотних дощів: простіше уникнути забруднення на стадії виробництва, ніж при видаленні у процесі очищення</i>	<i>Землекористування:</i> земля, призначена для вирощування сировини для виробництва біопалива, ставить під загрозу життя інших рослин, які там існують. Вуглецева недостатність може тривати до 500 років
<i>Використання в стандартних двигунах внутрішнього згоряння лише з незначними змінами.</i>	
<i>Безпечність:</i> біопаливо – біологічне. У разі його проливання, що живуть у природі, можуть використати його молекули як джерело енергії і розбити їх на нешкідливі побічні продукти	
<i>Легкість у видобуванні:</i> невисока собівартість біомаси	



Біоконверсія органічного субстрату в біопаливо I, II та III покоління