

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет агротехнологій та природокористування**  
**Кафедра біотехнології та хімії**

До захисту допускається

Зав. кафедрою, доцент

---

Владислав КОВАЛЕНКО

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему: «**Виробництво біопалива з біомаси**»

Виконав (-ла):

Іван КРУГЛЯК

---

*Ім'я ПРИЗВИЩЕ*

Група:

БІО 2101

Науковий керівник

Володимир ДУБОВИК

---

*Ім'я ПРИЗВИЩЕ*

Рецензент

Сергій ГОРБАСЬ

---

*Ім'я ПРИЗВИЩЕ*

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет агротехнологій та природокористування**

**Кафедра біотехнології та хімії**

**Ступень вищої освіти – бакалавр**

**Спеціальність – 162 «біотехнології та біоінженерія»**

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_  
**Владислав КОВАЛЕНКО**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**  
**Кругляку Івану Васильовичу**

Тема роботи: **Виробництво біопалива з біомаси**

1. Керівник бакалаврської роботи **Дубовик Володимир Іванович, к. с.-г. н., доцент**
2. Строк подання здобувачем закінченої роботи \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи – завдання до кваліфікаційної роботи; опрацьовано наукову літературу щодо отримання біопалива з біомаси, розглянуто технологічні процеси та отримання біопалива з біомаси в промислових масштабах.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно опрацювати) вступ, огляд літератури, технологічна частина, контроль якості, висновки, список використаних джерел, додатки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ / **Володимир ДУБОВИК** \_\_\_\_\_  
*підпис* *Ім'я, ПРИЗВИЩЕ*

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ / **Іван КРУГЛЯК** \_\_\_\_\_  
*підпис* *Ім'я, ПРИЗВИЩЕ*

Дата отримання завдання « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_ р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Вибір теми і об'єкта досліджень	5-й семестр	
2.	Розробка завдання до кваліфікаційної роботи; складання календарного плану; формування змісту розрахунково-пояснювальної записки (формування переліку питань, які необхідно опрацювати в роботі). Підбір методик для проведення досліджень	5-й семестр	
3.	Виконання кваліфікаційної роботи	8-й семестр	
3.1.	Підбір та аналіз літературних джерел з теми кваліфікаційної роботи	5-й семестр	
3.2.	Збір вихідних даних (проведення польових досліджень) для написання експериментальної частини кваліфікаційної роботи	6-й семестр	
3.3.	Підготовка загального варіанту кваліфікаційної роботи (розділ 1-3, висновки)	7-й семестр	
3.4.	Апробація результатів дослідження	За 40 днів до дати захисту	
4.	Перевірка роботи науковим керівником і допуск до попереднього захисту	За 35 днів до дати захисту	
5.	Перевірка кваліфікаційної роботи на унікальність	За 30 днів до захисту	
6.	Рецензування	За 15 днів до захисту	
7.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	За 10 днів до захисту	
8.	Прилюдний захист кваліфікаційної роботи перед екзаменаційною комісією	Відповідно наказу ректора	

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ / Володимир ДУБОВИК  
*підпис* *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Здобувач \_\_\_\_\_ / Іван КРУГЛЯК  
*підпис* *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

**АНОТАЦІЯ**  
Кругляк Іван Васильович  
**ВИРОБНИЦТВО БІОПАЛИВА З БІОМАСИ**  
162 Біотехнології та біоінженерія  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Суми – 2025

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню промислового отримання біопалива з агробіомаси. В ході роботи розглянуто динаміку виробництва основних сільськогосподарських культур в Україні та проведено аналіз виробництва біопалива із них. Подана оцінка перспектив використання агробіомаси з метою отримання біопалива в масштабах промислових.

Наведено схематично технології виробництва біопалива та визначено основні напрямки для покращення ефективності та конкурентоспроможності виробництва біопалива.

Було розглянуто виклики та бар'єри на шляху отримання біопалива з агробіомаси, які є технологічними, соціальними економічними та екологічними і є першочерговими завданнями перед інженерами та науковцями. Але існує низка ефективних рішень, які наведені в роботі та забезпечать високу продуктивність за зменшення витрат і з дотриманням принципів екологічної стійкості.

Робота має таку структуру: вступ, три розділи, висновки та пропозиції. Загальний обсяг – 40 сторінок, з них 30 сторінок відведені під основні розділи. В роботі наведено 5 рисунків та 4 таблиць, використано 42 джерел літератури.

Ключові слова: біопаливо, агробіомаса, види біомаси, виробництво.

## **ABSTRACT**

Kruglyak Ivan Vasylovych

### **BIOFUEL PRODUCTION FROM BIOMASS**

162 Biotechnology and Bioengineering

**SUMYNSK NATIONAL AGRICULTURAL UNIVERSITY**

**Sumy - 2025**

The qualification work is devoted to the study of industrial production of biofuels from agrobiomass. In the course of the work, the dynamics of production of major agricultural crops in Ukraine is considered and the production of biofuels from them is analysed. The prospects for the use of agrobiomass for the production of biofuels on an industrial scale are assessed.

The article provides a schematic outline of biofuel production technologies and identifies the main directions for improving the efficiency and competitiveness of biofuel production.

The challenges and barriers to biofuel production from agrobiomass, which are technological, social, economic and environmental, are considered and are the primary tasks for engineers and scientists. However, there are a number of effective solutions that are presented in this paper that will ensure high productivity at reduced costs and in compliance with the principles of environmental sustainability.

The work has the following structure: introduction, three sections, conclusions and proposals. The total volume is 40 pages, of which 30 pages are devoted to the main sections. The paper contains 5 figures and 4 tables, and uses 42 sources of literature.

Key words: biofuels, agrobiomass, biomass types, production.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ, СТРАТЕГІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВО БІОПАЛИВА З БІОМАСИ (Огляд літератури)	10
1.1. Загальний опис та характеристика біопалива з біомаси	10
1.2. Стратегії та технологія виробництва біопалива з біомаси.	14
1.3. Розділення та очищення продуктів біопалива.	17
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	19
2.1. Місце агробіомаси в контексті енергетичного потенціалу біомаси	19
2.2. Технологічний процес виробництва біопалива	21
РОЗДІЛ 3. КОНТРОЛЬ ТА ЯКІСТЬ БІОПАЛИВА	26
3.1. Вимоги та забезпечення якості біопалива	26
3.2. Технологічні та організаційні бар'єри та пропозиції їх вирішення	26
3.3. Економічні та екологічні бар'єри	30
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35
ДОДАТКИ	40

## ВСТУП

Біопаливо чи біологічне паливо (англ. biofuel) – це паливо, здобуте та зроблене з органічних матеріалів, як-от рослини та їх залишки (дерева та їх залишки, відходи, побічні продукти, теж саме стосується і сільськогосподарських культур), яке може бути використане для виробництва енергії в біоенергетиці[1].

Біопаливо – це паливо, що виробляється за допомогою технологічних процесів із біомаси, на відміну від інших природних ресурсів, як-от нафта й вугілля. Які були вироблені в результаті дуже повільних геологічних процесів землі. Найбільша перевага біологічного палива у порівнянні з іншими видами пального – те, що воно має здатність повністю розкладатися мікроорганізмами, й тому не має небезпечного впливу для довкілля.

Продукція сільського господарська, яку вирощують для застосування як біопаливо, містить сою, ріпак, кукурудзу, льон, цукрову тростину або навіть пальмову олію. Продукція яка була розкладена мікроорганізмами промисловості, сільського господарства, лісництва та побутові відходи також можуть застосовуватися для здобуття біоенергії. Зокрема, побічні продукти сільськогосподарської промисловості та харчової, лісоматеріал, солома, стічні води й харчові відходи [1].

Новітні технології, дозволяють здобувати біопаливо зі спеціально підібраних водоростей, мікроорганізмів, дріжджів та інших. Ба більше, ці мікроорганізми попередньо спеціально модифікують методом генетичної й клітинної інженерії для покращення ефективності та зниження витрат у процесі виробництва біопалива[2].

**Актуальність теми.** Одна з ключових тем є у вирішенні завдання отримання біопалива з біомаси, що вирішує проблематику давно відомих та сталих джерел енергії, доведено, що це напрям до зменшення викидів CO<sub>2</sub> та сприяє сталому розвитку. Виклики, які є технологічними та соціальними

ставлять невідкладні задачі перед інженерами та науковцями. Ці задачі полягають у розвитку та впровадженні сучасних методів й технологій для підтримки напряму у виробництві енергії.

При вирішенні питання, щодо пошуку сталих та відновлюваних енергетичних джерел, саме виробництво біопалива з біомаси є найбільш актуальним.

Працівники метеорологи застерігають про змін клімату, а останніми роками такі побоювання зростають. Тому, виробництво біопалива з біомаси стає ще більш перспективним завданням, враховуючи обмеженість традиційних джерел палива.

При отриманні біопалива з біомаси є декілька переваг:

- Її відновлюваність: біомаса є відновлюваним ресурсом, який може бути вирощений щорічно, на відміну від необоротних вуглеводнів.
- Зменшення викидів CO<sub>2</sub>: Впровадження, виробництво і відповідно споживання біопалива призведе до зменшення загальної кількості викидів CO<sub>2</sub>. Це пояснюється тим, що рослини, під час вегетації поглинають цей газ в процесі фотосинтезу.
- Якщо вирощувати енергетичні культури, то відповідно не буде конкуренції з культурами, які є продуктами харчування. Це дозволить уникнути непорозумінь або навіть суперечок у використанні площ під посіви.
- Сільські громади також мають переваги, якщо почнуть вирощування енергетичних рослин. Це спонукатиме до розвитку громади, забезпечить нові можливості для та робочі місця.
- При застосуванні біопалива є можливість змінити джерело енергії. Цей захід робить населення менш залежним від звичайних джерел палива.

Але водночас при отриманні біопалива з біомаси є технологічні виклики, які є основою і їх потрібно вирішувати:

- Технологічні зміни , удосконалення та інновації у цій сфері можуть зменшити вартість виробництва та збільшити отримання біопалива.
- Розробити нові та удосконалити відомі біологічні процеси для ефективного отримання біопалива з біомаси .

**Мета і завдання дослідження.** Наша мета є в оцінці тренду використання біопалива та зробити дослідження способів його виробництва задля підвищення продуктивності.

Виходячи з мети роботи, нами були сформульовані завдання дослідження:

1. Розглянути та проаналізувати перспективи лігноцелюлозної біомаси, яка отримана в сільськогосподарській галузі, як перспективну сировину для виробництва біопалива;
2. Порівняти між собою способи виробництва біопалива та оцінити їх витрати. Зрозуміти які мінімальні витрати залежно від способу виробництва при здобутті продукції.
3. Визначити яким чином можна удосконалити технологічні процеси задля покращення ефективності та конкурентоспроможності;

**Об'єкт досліджень.** Технологія та впровадження біопалива. Лігноцелюлозна біомаса та різноманітні інші біомаси для отримання біопалива.

**Предмет досліджень.** Методи та технології отримання біопалива з біомаси.

**Методи досліджень.** Технологічні, біотехнологічні, статистичні.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В цій роботі проведена порівняльна оцінка технологій та підходів до її виконання. Все це поліпшує ефективність, економічність та екологічність виробництва біопалива. Особливу увагу приділено технології переробки з використанням сучасних методів ферментації, піролізу, гідролізу та інших процесів. Розглянуто вторинні відходи від виробництва сільськогосподарської діяльності для використання їх при отриманні біопалива.

**Практичне значення здобутих результатів.** Оцінено перспективи використання енергетичних рослин з великим вмістом біомаси та ефективно пристосованих до місцевих умов.

Розглянуто різні методи перетворення біомаси на біопаливо, враховуючи ферментацію, гідроліз, піроліз, та інші процеси. Проаналізовано головні проблеми виготовлення біопалива з агробіомаси, враховуючи економічний та екологічний вплив.

**Особистий внесок здобувача.** Брав участь у проведенні досліджень, у збиранні та обробці результатів дослідження.

**Структура і обсяг.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, 5 рисунків, 4 таблиць, висновків, з 42 використаних літературних джерел та додатків.

## РОЗДІЛ 1

### ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ, СТРАТЕГІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВО БІОПАЛИВА З БІОМАСИ

Біопаливо наступного, тобто другого покоління, виготовлене вже з лігноцелюлозної біомаси (LCB). Воно має потенціал та вже конкурує з викопним паливом, але за умови, що у такому процесі виробництва використовують економічно ефективні методики. Виробництво біопалива це доволі складний процес, в собі він має кілька технологій і методів. При перетворенні лігноцелюлози на функціональне біопаливо, для отримання максимального виходу обов'язково це слід враховувати.

#### **1.1. Загальний опис та характеристика біопалива з біомаси**

Відновлювальна енергетика є важлива у теперішній і майбутній час для того, щоб подолати та замінити швидко вичерпні запаси викопного палива. Також відновлювальна енергетика передбачає зменшення шкоди на навколишнє середовище шляхом управління над кількість викидів парникових газів при цьому відбувається і контролю екологічних проблем, які тісно пов'язані із забрудненням. У зв'язку з цим є тісний зв'язок між відновлювальною енергією та сталим розвитком [1,2].

Згідно тощо, що наведено в директиві Європарламенту а також Ради Європи 2009/28/ЕС, біомасою вважається речовина, яка має органічне походження. Та розкладається біологічно— продукти, відходи, сільськогосподарські та лісогосподарські залишки і також деяка частина побутових та промислових відходів, що має біологічний розклад. В Українському законодавстві визначення біомаси, міститься в Законі України «Про альтернативні види палива», в ньому написано, що біомаса – біологічно відновлювальна речовина, яка має органічне походження, а це значить, що біологічно розкладається (сільськогосподарські відходи, а це нацчастіше рослинництво та тваринництво), лісового господарства та галузь

промисловості, яка з ним пов'язана, а органічна частина побутових відходів від промислових підприємств. Походження біомаси є різноманітним, починаючи з відходів або залишків сільського господарства, харчова промисловість, домашнє господарство і навіть відходи комунального господарства. Дуже гарним джерелом біомаси є відходи деревини з лісового господарства, промисловість, яка має напрямки деревообробного та целюлозно-паперового. При виробництві біомаси використовують також спеціальні культури, їх називають енергетичними, бо вони дають приріст маси дуже швидко (тополя, верба, платан), також сюди відносять і 8 сортів трав'янистих рослин (просо, міскантус, сорго та інші).

Для того, щоб з біомаси отримати енергію її (рис. 1.1) можна безпосередньо спалювати або використовувати в переробленому у вигляді рідких (спирти, ефіри ріпакової олії, рідкі продукти піролізу) або газоподібних біопалив (біогаз з відходів рослинництва або тваринництва, осаду стічних вод, продукти газифікації твердих палив та твердих побутових відходів).

Викопне паливо на сьогодні є і залишається основним джерелом енергії у світі. Вичерпання його запасів є проблемою в майбутньому, через збільшення населення світу та зростання попиту [3].

На сьогодні світовою проблемою охорони довкілля та здоров'я є забруднення повітря, яке спричинене згоранням викопного палива. Це призводить зміни клімату погіршення екологічності навколишнього середовища, призводить до захворювань які пов'язані із забрудненням повітря. Все це щороку призводить до мільйонів смертей у світі.

Основним джерелам забруднення повітря залишаються викиди промислових підприємств, електростанцій та автотранспорту який виділяє шкідливі парникові гази, а саме тверді частинки, оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), чадний газ ( $\text{CO}$ ), леткі органічні сполуки (ЛОС), метан ( $\text{CH}_4$ ), оксиди сірки ( $\text{SO}_x$ ) [4].

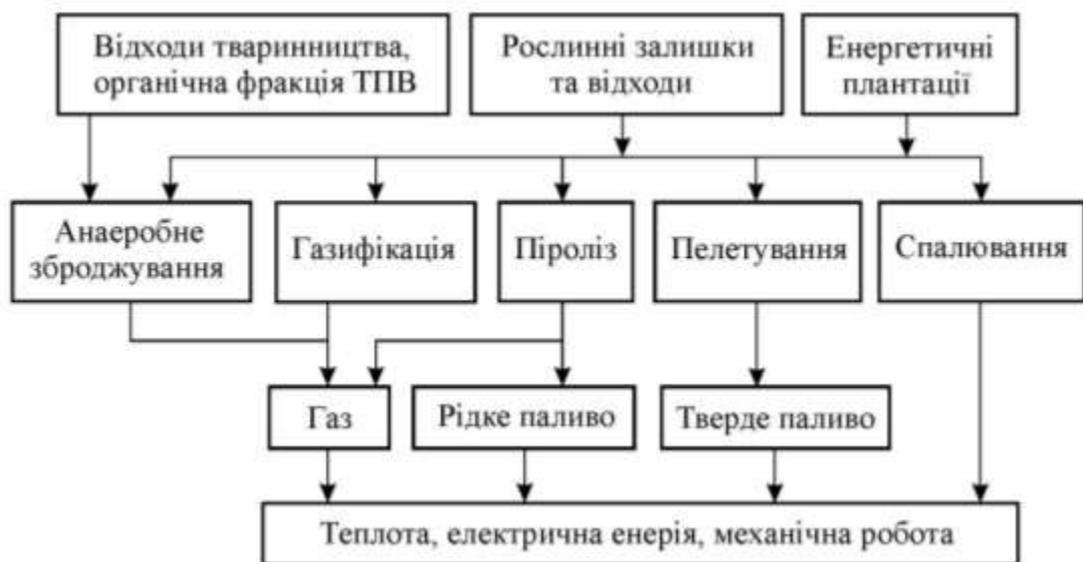


Рис 1.1 Різновиди отримання енергії з біомаси

Від того загального обсягу отриманої біоенергії, виробництво з біомаси призвело до того, що використання рідкого біопалива збільшилося з 1% (2000 рік) до 6% (2016 рік) [4]. Таке біопаливо поєднують з бензином у певному співвідношенні, яке є придатним для палива автомобілів. Зараз вже Бразилія рекомендує змішувати 27% етанолу з бензином, на томість Індія ставить цілі змішувати близько 20% в термін до 2025 року [5].

Відомо, що біомаса може складатися лише з усіх форм тваринної та рослинної речовини, але рослинна все-таки залишається найпоширенішою [6]. На відміну від біомаси, яка вирощена спеціально для продукування енергії, відходи від біомаси та її залишки є побічними витворами сировини після обробки або її споживання.

Останнім часом лігноцелюлозні відходи набули значного інтересу, як аграрна біомаса або біомаса сільськогосподарської продукції. Інтерес утворився за рахунок того, що щорічно утворюється великий обсяг сільськогосподарської біомаси, а вона має високу теплотворну здатність [7]. Доведено, що біомаса кукурудзи, рису та пшениці забезпечує найбільший вихід біоетанолу [8].

Класифікувати біопаливо можна за 4-ма поколіннями, які залежать від сировини та методів виробництва [9]. Перше покоління біопалива

виробляється при використанні харчових культур, наприклад з пшениці, картоплі, кукурудзи тощо як субстрат. [9].

Друге покоління біопалива виробляється за використання неїстівних LCB, а це відходи сільськогосподарських культур та міські [10]. Третє покоління біопалива виробляється з допомоги мікроводоростей, як основна сировина. [11]. Четверте покоління біопалива є продовженням третього покоління, коли біопаливо виготовляють за використання водоростей, які попередньо були генномодифіковані з метою отримання підвищеного отримання біопалива [12]. Різноманітні етапи отримання біопалива з лігноцелюлозних відходів сільськогосподарського виробництва зображені на Рис. 1.2.

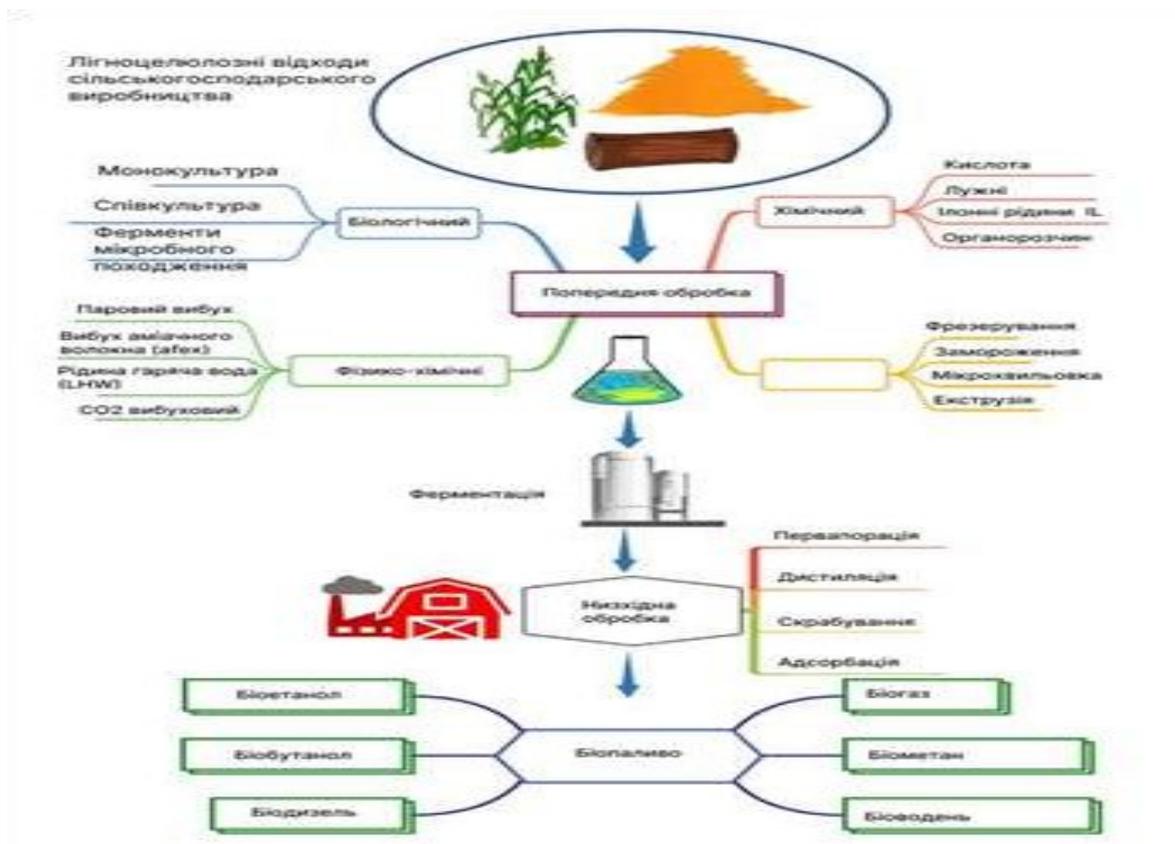


Рис. 1.2 Етапи виробництва біопалива.

Матеріали та відходи, які залишаються після процесу переробки, взагалі не мають економічної цінності. Такі відходи ділять на три групи:

первинні, вторинні та третинні відходи біомаси.

Залишки біомаси, які є первинні і утворилися після збирання продовольчих і лісових культур, наприклад солома, стебла кукурудзи, листя тощо. А от вторинні залишки біомаси, це ті, які утворилися під час обробки харчових культур. Ця біомаса складається з деревної тріски, лушпиння кави, лушпиння цукрової тростини, рисового лушпиння, макухи з пальмового ядра тощо. Третинна біомаса, це залишки після споживання продуктів, які отриманих із біомаси тваринами або людьми, і найчастіше вони утворюються як тверді побутові відходи (ТПВ).

Сільське господарство є однією з найважливіших видів діяльності та займає близько 37 % земель у світі [13]. Ця діяльність має велику кількість відходів біомаси під час виробництва, а саме трав'яниста та деревна побічна продукція [14, 15, 16]. Всесвітня асоціація біоенергетики разом з Міжнародним енергетичним агентством та підраховали, що така біоенергія, яка отримана з біомаси, вже складає до 72,3% від обсягу відновлювальної енергії. [17].

## **1.2. Стратегії та технологія виробництва біопалива з біомаси**

Лігноцелюлозні матеріали є складовими відходів біомаси сільськогосподарських підприємств, сюди відносять целюлозу, геміцелюлозу та лігнін. Властивості геміцелюлози і лігніну за структурою відрізняються в різних біомасах, що робить структурну жорсткість LCB

Лігноцелюлозні матеріали мають в собі сполуки вуглецю, який можна переробляти при виробництві енергії використовуючи для цього різні процеси. Під час виробництва біопалива з лігноцелюлози, в кожному процесі необхідно звертати увагу на такі характеристики: (1) деполімеризація геміцелюлози та целюлози до розчинних цукрів (2) гарне бродіння цукрів (3) введення нових методів для мінімізації потреб в енергії для обробки (4) економічно ефективна технологія [18]. В таблиці 1.1., наведено виробництво біопалива з різної біомаси лігноцелюлозних відходів сільського

господарства.

**Таблиця 1.1**

Виробництво різних видів біопалива з біомаси відходів виробництва сільськогосподарського.

Біопаливо	Сільськогосподарські відходи	Попередня обробка	Вихід цукру	Система виробництва	Вихід біопалива
Біоетанол	Рисова солома	розведена сірчана кислота	—	СВР з кальцієм карбонат, поліетилен гліколь і натрій ацетатні добавки	48% з 142 мМ
	Кокосове лущиння	Комбінований гідротермальний і NaOH	257.14 ± 0,92 г/л	ШФ** з використанням сахароміцети	27,19 г/л с продуктивність 0,57 г/л/год
	Стебло бавовнику	7,0% NaOH	241 мг/г	Ферментація	3,798 г/л
Біобутанол	Солома цукрової тростини	Гаряча вода	55 г/л при 15% мас./об	Ферментація методами оцукрювання та бродіння	95 л на тонну підкладка
	Рисова солома	Мікрохвильовий гідротермоліз	—	Ферментація <i>C. beijerinckii</i>	0.114г/л/год
	Кукурудза на плита	сірчана кислота і водні аміак	—	SSF ферментація	0,18 г/г субстрату
Біометан	Рис	паровий вибух	41%	Анаеробне травлення (AD) > мулом	96,1% с Продуктивність 199 мл/г
	Залишок обробки рису	рідкої гарячої води	—	AD	276 л/кг VS
	Кукурудзяна солома	Похідні ферментів	—	AD	512,64 мл/г TS

Процес ферментації, це процес коли мікроорганізми або мікробні ферменти використовують для виробництва органічних кислот та спирту. В процесі цього утворюються різні вторинні метаболіти, які можуть включати антибіотики, біоповерхнево-активні речовини, фактори росту ферменти, тощо. У процесі ферментації моносахариди, які вивільнилися гідролізом

полісахаридів із LCB, пізніше перетворюються на органічні кислоти або паливо [19].

Субстратна (або твердофазна) ферментація (SF) – це процес бродіння, під час якого субстрати з невеликої кількості вільної води або без неї використовують субстрат для нормального росту мікробів. Метод SF викликає великий інтерес при виробництві біопалива з лігноцелюлозних залишків [22]. Одна з основних переваг SF це його здатність утилізувати рясні, складні та недорогі сільськогосподарські відходи [23].

Виготовлення біоетанолу з залишків або відходів ананасів *Aspergillus niger* окультурений с *Saccharomyces cerevisiae* в SF, як доведено, був успішним і суттєво конкурує із зануреним бродінням, яке вважається зазвичай кращим для виробництва біоетанолу [24]. Біоводень отримали за допомогою *Clostridium termitidesi*, та *Clostridium intestinalis*, які були використанні у співвідношенні 5:1 на лущинні рису в мезофільних умовах у субстрактній ферментації (SF) [25].

Глибинне бродіння (SmF) — це метод, який використовується для процесів бродіння, у яких субстрати занурюють у водне середовище. SmF часто використовують для виробництва ферментів, таких як целюлаза, геміцелюлаза та ксиланаза з LCB з використанням мікроорганізмів. Ферменти в подальшому можуть бути використані під час виробництва біопалива.

В системи обробки SSF. SSF вже інтегровані етапи гідролізу та ферментації - це етап бродіння комбінованого гідролізу і етап утилізації цукру для створення продуктів за рахунок бродіння [26]. Технологія SSF дуже відома і часто використовується при виробництві біопалива, бо має низку переваг, серед них зниження витрат на експлуатацію реакторів зсуву, що необхідні для SHF [27, 28].

Анаеробне зброджування (AD) проводять для розкладання мікроорганізмами за відсутності кисню речовини біологічного та органічного походження. В деградації різної і складної органічної біомаси з

різноманітних джерел (сільськогосподарські, агропромислові, міські та промислові відходи тощо) допомагає AD [29, 30].

Відходи від сільського господарства складаються з LCB і їх багато за кількістю в світі, тому вона є ідеальною сировиною для AD під час виробництва біоенергії [31]. Один із недоліків анаеробного зброджування є виділення парникових газів. Серед них є метан та вуглекислий газ (вони також є присутні як компоненти біогазу в межах 48%–65% метану та 36%–41% вуглекислого газу) при анаеробному зброджуванні [32].

Термічна деградація або піроліз залишків біомаси для виробництва біопалива є ефективним заходом. Полягаю в термохімічній технології і передбачає обробку лігноцелюлозної біомаси високими температурами, які вище 230°C [33]. Термічний крекінг це ключова реакція процесу піролізу, коли нагрівання при високих температурах вивільняє газоподібні сполуки органічні та неорганічні. Під час піролізу маємо конденсовані гази [34].

### **1.3. Розділення та очищення продуктів біопалива**

Для відокремлювання біоетанолу від води і інших часточок у бульйоні ферментаційному, відбувається за допомогою системи розділення, яка вже інтегрована та широко застосовується при відновленні біоетанолу.

Первапорація - це метод, завдяки якому відбувається розділ рідких сумішей за допомогою мембран. Поділ засновали на різних варіаціях коефіцієнтів розчинності і швидкості дифузії компонентів її суміші. В процесі фазового перетворення споживається енергія у вигляді тепла, а це робить внесок у вартість виробничого процесу. В основному цей процес використовують для виробництва біоспиртів, біоетанолу і біобутанолу [39].

Дистиляція - це процес, який широко використовують для розділення рідких сумішей. В ньому створюють двофазну систему, так що рідка суміш була в тісному контакті з іншою фазою. При контакті створюють такі відповідні термодинамічні умови, що компонент, який треба відокремити від рідкої суміші, перетворюється у другу фазу в вигляді пари.

При виробництві біопалива є кілька важливих етапів, які забезпечать високий рівень отриманої продукції і в той же час зменшують витрати під час виробництва та підтримують екологічну чистоту. З літературного огляду ми зробили такий висновки

- Сільськогосподарська лігнобіомаса має шанс та може бути перспективною сировиною при виробництві біопалива, але лише при умові використання відповідних методів для попередньої обробки з метою посилення гідролізу і деградації лігноцелюлози. Етап попередньої обробки є важливим процесом і він безпосередньо впливає на гідроліз лігноцелюлози до звичайних ( простих ) цукрів, саме ті, що далі використовують для бродіння та розщеплення при виробництві біопалива.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### **2.1. Місце агробіомаси в контексті енергетичного потенціалу біомаси**

Водночас за оцінками фахівців Україна зможе збільшити виробництво зернових та олійних культур до 100 млн. тон в рік. Отут можна говорити, що країна має стабільно високі виробничі обсяги основних агрокультур з можливістю їх подальшого росту, що є потужним джерелом цілого ряду відходів та супутньої продукції. Статистичні дослідження свідчать той факт, що до сьогодні в Україні біомаса аграрного походження залишається найбільш великою складовою енергетичного потенціалу біомаси. Так, на квітень 2022-2024 рр., економічний потенціал цих видів біомаси, які можливо використовувати для виробництва енергії, складає майже 9 млн. тон нафтового еквівалента, або 43% від загального – 20,9 млн. т н. е. Ці величини є постійними вже декілька останніх років (Табл. 2.1). На жаль, розвиток цього напрямку все ще відбувається занадто повільно. З 3-4 млн гектарів наявних вільних земель сільськогосподарського призначення, які могли б використовуватись для вирощування енергетичних культур (таких як верба, міскантус, сорго тощо), на сьогодні зайнято лише близько 4,8 тис. гектарів. Таким чином, потенціал енергетичних культур наразі залишається переважно теоретичним, на відміну від рослинних залишків та інших видів біомаси, які вже реально входять до енергетичного потенціалу. Деревна біомаса в Україні має доволі обмежений енергетичний потенціал, що оцінюється приблизно у 2,6 млн тон у.п./рік (див. Табл. 2.1), при цьому рівень її використання надзвичайно високий — понад 90%.

Таблиця 2.1.

Енергетичний потенціал біомаси в Україні (2022 – 2024 р.).

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн. т	Потенціал, доступний для енергетики	
		Частка потенціалу, %	млн. т н.е.
Солома зернових культур	35,6	30	3,65
Солома ріпаку	3,9	40	0,54
Побічні продукти виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	32,1	40	2,45
Побічні продукти виробництва соняшника (стебла, корзинки)	23,2	40	1,33
Вторинні відходи с/г (лушпиння соняшника)	2,4	100	0,99
Деревна біомаса (дрова, порубкові залишки, відходи деревообробки)	6,6	94	1,54
Деревна біомаса (сухостій, деревина від реконструкції захисних лісосмуг, відходи ОВБСН)	8,8	44	1,01
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,31
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,59
Біогаз з відходів та побічної продукції агропромислового комплексу	1,6 млрд. м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	50	0,68
Біогаз з полігонів твердих побутових відходів	0,6 млрд. м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	34	0,18
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	1,0 млрд. м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	23	0,19
Енергетичні культури:			
- верба, тополя, міскантус (1 млн. га)*	11,5	100	4,8
- кукурудза (на біогаз) (1 млн. га)*	3,0 млрд. м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	100	2,57
<b>Всього</b>	-	-	<b>20,91</b>
<i>Всього первинні та вторинні відходи с/г (частка від загального потенціалу біомаси):</i>			
<i>2024 р.</i>			<i>8,96 (43%)</i>
<i>2023 р.</i>			<i>9,02 (43%)</i>
<i>2022 р.</i>			<i>8,12 (42%)</i>

Тому в найближчій перспективі найдоцільнішою стратегією є розширення виробництва енергії з біомаси за рахунок агробіомаси та енергетичних культур. Це тим більше актуально, що рівень використання їхнього потенціалу в країні залишається дуже низьким — лише від 0 до 2-3% залежно від конкретного виду (див. Таблиця 2.2).

Таблиця 2.2.

Енергетичний потенціал біомаси України (2022-2024 р.).

Вид біомаси та напрямок використання	Потенціал, доступний для енергетики, тис. т	Обсяг, що вже використовується для потреб енергетики		Частка загального потенціалу, %
		тис. т	тис. т н.е.	
Солома зернових/ріпаку:	12258	371	130	3,0
- спалювання (тюки)		200	68	1,6
- виробництво та спалювання пелет		155	55	1,3
- виробництво та експорт пелет		0,97	0,35	0,01
- виробництво та спалювання брикетів		15	5,5	0,1
Стебла, стрижні кукурудзи	12828	15	5,0	0,1
Стебла, кошики соняшника	9299	0	0	0,0
Деревна біомаса:	10117	10037	2713	99,2
- спалювання (дрова)		7040	1848	69,6
- спалювання (тріска)		1405	340	13,9
- експорт дров/тріски		850	223	8,4
- виробництво та спалювання пелет		240	97	2,4
- виробництво та експорт пелет		332	135	3,3
-виробництво та спалювання брикетів		170	69	1,7
Лушпиння соняшника:	2374	1500	626	63,2
- спалювання		650	271	27,4
- виробництво та спалювання пелет		300	125	12,3
-виробництво та експорт пелет		450	188	19,0
Жом цукрового буряку (W 13%)	4410	200	10,2	4,5
Силос кукурудзи (зелений)**	27000	15	1,9	0,06
Гній тварин та послід птахівництва	30020	335	12,9	1,1
<b>Всього</b>	<b>108306</b>	<b>12473</b>	<b>3546</b>	<b>в середньому: 11,5%</b>

## 2.2 Технологічний процес виробництва біопалива

На сьогоднішні вже є багато різноманітних етапів та процесів технологій виробництва біопалива (рис 2.3), однак лише деякі з них набули широкого застосування, це повзано з проблемами створенням сучасного обладнання та також враховано, що вони мають малу ефективність.

В таблиці 2.3 наведена порівняльна характеристика цих двох технологій, особливу увагу ми приділили визначенню переваг та недоліків кожної з технологій. З таблиці наглядно бачимо, що переваг в обох технологіях значно більше ніж недоліків.

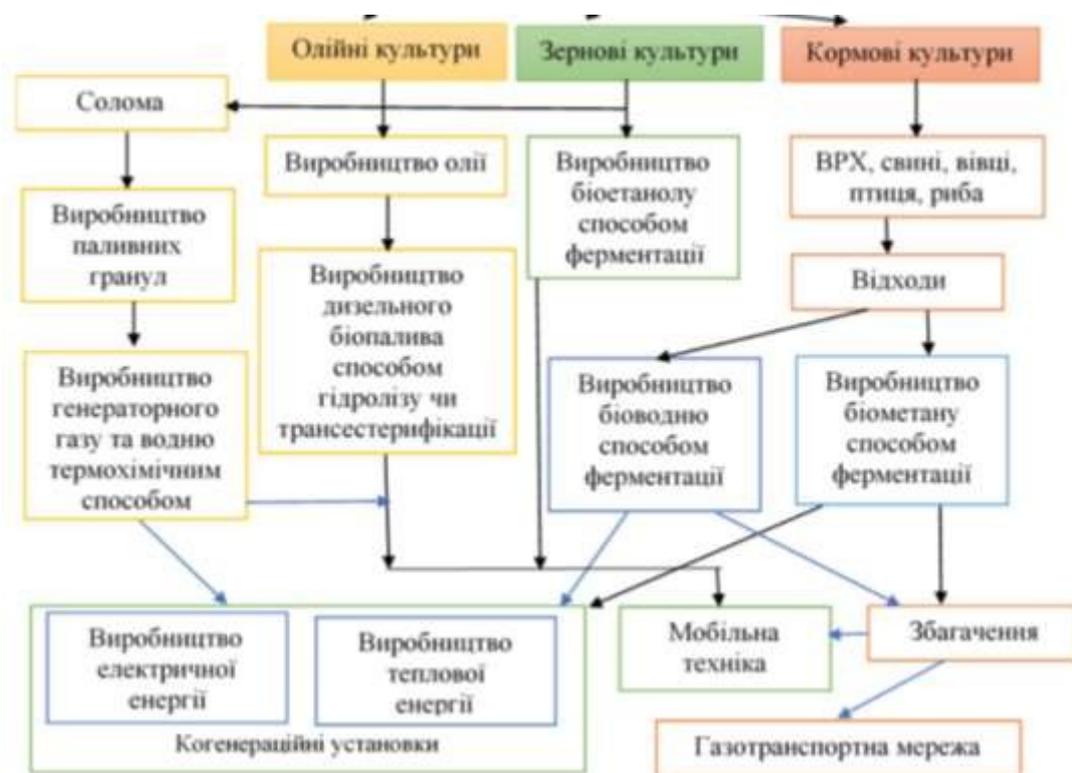


Рис. 2.3. Виробництво та використання біопалива в сільськогосподарських підприємствах

Умовно всі технології які існують ділять на дві групи (рис. 2.4 та 2.5): це промислові і агропромислові.

**Таблиця 2.3**

Порівняння промислової та агропромислової технологій

Переваги	Недоліки
Промислова технології	
Гарна якість виробленої продукції, великий термін придатності олії та продуктів з неї, збільшений вихід олійної маси неочищеної за допомогою використання методу екстракції.	складність обладнання, значні витрати електроенергії, втрата корисних поживних речовин під час рафінації.
Агропромислова технологія	
мала кількість етапів виробництва (відсутні процесу екстракції та волого-теплої обробки в отриманні олії сирови), простота та доступність обладнання, отримана олія має природний смак, забарвлення та запах, собівартість цієї виробленої продукції нижча за рахунок малих витрат електроенергії.	отримана рослинна олія має нижчу якість, в складі є вільні жирні кислоти, фосфоліпіди, а також малий термін придатності.



Рис. 2.4. Схематичне зображення виробництва рослинної олії

Промислова технологія виготовлення дизельного біопалива базується на кількох основних етапах: естерифікація, розділення на фракції (дизельне біопаливо та гліцериновий осад), відгонка метанолу, промивка біопалива підкисленою водою та видалення вологи.

Естерифікація полягає у взаємодії суміші жирних кислот (тваринного чи рослинного походження) зі спиртом (метанол, етанол тощо) у присутності лужного каталізатора (наприклад, KOH або NaOH). У процесі реакції утворюються дизельне біопаливо та гліцериновий осад, який містить гліцерин і залишки спирту.

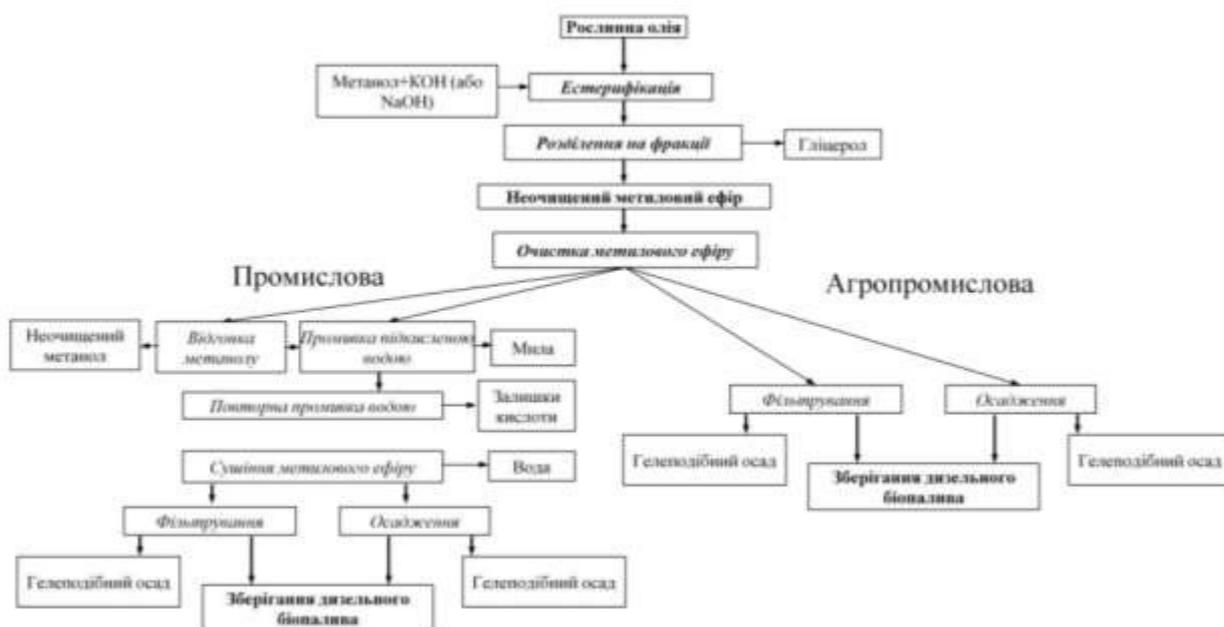
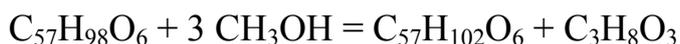


Рис. 2.5. Схема виробництва дизельного біопалива

Хімічна реакція естерифікації відбувається за цим наближеним виразом:



де  $C_{57}H_{98}O_6$  – рослинна олія та  $CH_3OH$  – метиловий спирт;  $C_{57}H_{102}O_6$  – метиловий ефір (дизельне біопаливо) та  $C_3H_8O_3$  – гліцериновий осад.

При виробництві з рослинної олії вихід біопалива є близьким до вихідної кількості олії, хоча в реальних умовах ефективність становить 85–95%. Відгонка метанолу необхідна через його негативний вплив на гумові компоненти двигунів і лакофарбові покриття.

Промивання підкисленою водою дає змогу видаляти залишки каталізатора, що запобігає утворенню осаду. Після цього проводять повторну промивку для усунення решток кислоти. Завершальний етап — зневоднення біопалива, оскільки навіть незначна кількість води може призвести до погіршення згоряння, зниження потужності двигуна, корозії й утворення нагару. Ця технологія найефективніше застосовується на великих промислових підприємствах із річним обсягом виробництва від 20 до 100

тисяч тон. Її перевагою є висока якість продукту, що дозволяє використовувати біопаливо як самостійно, так і в сумішах із традиційним паливом.

Однак така технологія має свої недоліки — високі вимоги до обладнання, енергозатратність та значну собівартість продукції. Агропромислова технологія виробництва застосовується здебільшого для невеликих обсягів (100–5000 тон на рік). Вона включає естерифікацію, розділення на фракції (дизельне біопаливо та гліцериновий осад) і очищення (відгонка метанолу та видалення осаду фільтрацією чи осадженням). Головні переваги цієї технології — нижчі витрати енергії, простота обладнання та зменшена собівартість продукції.

## **РОЗДІЛ 3**

### **КОНТРОЛЬ ТА ЯКІСТЬ БІОПАЛИВА**

#### **3.1 Вимоги та забезпечення якості біопалива**

Контроль якості відіграє ключову роль у виробництві біопалива. Для забезпечення відповідності продукції вимогам безпеки та ефективності використовуються стандарти якості, лабораторні випробування та ретельний моніторинг.

Сучасні системи слідкування й маркування дозволяють відстежувати кожен партію продукту від виробництва до кінцевого споживача. Важлива увага приділяється також якості сировини — її ретельний аналіз допомагає уникати забруднень і зберігати високу якість кінцевого продукту. Крім того, систематичний моніторинг виробничих процесів допомагає своєчасно виявляти й вирішувати будь-які технічні проблеми.

Проте розвиток галузі гальмують низка бар'єрів, які умовно поділяються на технологічні, організаційні, економічні та екологічні. Зокрема, агровиробники зазвичай не мають спеціалізованої техніки для збору побічної продукції рослинництва для потреб енергетики. У таких випадках потрібно змінювати агротехнології, інвестувати в обладнання та додатково залучати ресурси.

Подолання цих складнощів потребує подальших досліджень та координації зусиль виробників і регуляторних органів для гармонічного розвитку біопалив. Проаналізуємо подолання цих складностей згрупувавши їх по типам – організаційні, технологічні, економічні та екологічні

#### **3.2. Технологічні та організаційні бар'єри та пропозиції їх вирішення**

Відсутність у агровиробників техніки для збору побічної продукції

рослинництва для енергетичних потреб Агровиробники переважно орієнтовані на отримання максимального прибутку від основної товарної продукції, і процес збору побічної продукції часто потребує змін у звичних агротехнологіях, інвестицій у спеціалізовану техніку та залучення додаткових ресурсів. Наприклад, збирання побічної продукції кукурудзи передбачає послідовне скиртування кукурудзиння, пресування у тюки, збір по полю та їх транспортування до спеціально підготовлених складів для зберігання. Все це супроводжується істотними витратами, тоді як за традиційної технології зернозбиральний комбайн рівномірно розподіляє рослинні рештки по полю, і такі втрати відсутні.

Одним із невирішених питань є ефективне використання стебел соняшника, враховуючи їхню високу вологість (40–50%) на момент збору врожаю. Як потенційне рішення можна розглядати силосування стебел для подальшого виробництва біогазу або ж залишення їх на полі до весни для природного підсихання, після чого здійснювати збір у формі тюків чи подрібненої маси. Подібна біомаса може бути використана як паливо для котлів чи сировина для виготовлення брикетів та пелет. Нині в Україні практично відсутній досвід використання рослинних решток соняшника в енергетиці, за винятком лушпиння, яке активно застосовується для виробництва пелет/брикетів або як паливо на підприємствах олійноекстракційної галузі.

Рекомендації для прийняття рішень щодо заготівлі побічної продукції рослинництва агровиробники мають бути впевнені, що це не вплине на урожайність основної продукції. Особливо важливо врахувати цей аспект у разі довгострокових контрактів на постачання біомаси. Необхідно ідентифікувати можливі ризики, розробити заходи для їх мінімізації, внести зміни в агротехнології та забезпечити придбання необхідного обладнання. Зі свого боку, споживач повинен отримати гарантії щодо якісних та кількісних характеристик біомаси. Ключові положення мають бути детально прописані

у відповідному договорі.

З огляду на значний потенціал побічної продукції рослинництва в Україні доцільним є впровадження низки проектів, які можуть фінансуватися за рахунок грантових коштів. Такі проекти мають тестувати технології заготівлі та постачання агробіомаси.

Перспективними напрямками можуть стати:

- заготівля кукурудзяних стебел;
- заготівля кукурудзяних стрижнів;
- збирання соняшникових стебел;
- впровадження котелень на тюкованій соломі чи стеблах кукурудзи.

*Одне з питань це складність організації логістичного ланцюжка заготівлі та поставок.* Рослинна біомаса зазвичай має розпорошений характер через особливості сільськогосподарських культур та агротехнологій. Збір можливий тільки надземної частини культур, як-от солома чи полова, обсяги яких становлять 2–5 т/га. Решта рослинних елементів, як стерня чи коренева система, залишається в ґрунті. Для ефективної логістики біомасу доцільно ущільнювати у тюки, брикети чи пелети.

Вологість матеріалу значною мірою впливає на його теплотворну здатність і тривалість зберігання, адже надлишкова волога спричиняє псування біомаси, що є негативно під час зберігання. Такі особливості слід враховувати при організації заготівлі, зберігання та поставки рослинних решток.

Необхідність застосування спеціалізованих машин і обладнання для збирання, переробки й транспортування побічної продукції рослинництва та виробництва твердих біопалив спричиняє значні капітальні витрати. Такі затрати передбачають використання техніки, зокрема прес-підбирачів для великих прямокутних тюків, самозавантажувальних причепів, потужних

тракторів, навантажувачів, автотранспорту, дробарок, прес-брикетувальників, грануляторів тощо.

Рекомендації для ефективного впровадження проектів з використання побічної продукції рослинництва у енергетичних цілях важливо опиратися на успішний досвід вітчизняних і закордонних ініціатив. Слід зосередити зусилля науковців і практиків на адаптації базових технологій та розробці підходів, які забезпечать організацію оптимальних ланцюгів «заготівля-постачання» відповідно до потреб локальних видів агробіомаси.

*До організаційного бар'єру можна віднести нерозвиненість ринку біопалива.* Ринок біопалива в Україні залишається недостатньо розвиненим. Відсутня єдина платформа для ефективної торгівлі біомасою різних видів з чіткими вимогами щодо обсягів і якості сировини. Це особливо ускладнює реалізацію проектів біоенергетики. Для залучення інвестицій власники таких проектів повинні мати гарантії постачання необхідних обсягів та видів біомаси, а агровиробники готові організувати постачання лише за наявності впевненого попиту.

Рекомендуємо, та вважаємо це просто необхідно створити в Україні національну систему електронної торгівлі біопаливом за взірцем литовської платформи Baltpool 30.

*Наступним організаційним бар'єром є складність контролю спалювання рослинних залишків* Попри законодавчу заборону спалювання рослинних решток на полях ця практика досі є поширеною через брак належної альтернативи. Розвиток біоенергетики може стати ефективним інструментом у вирішенні цієї проблеми.

Рекомендуємо органам місцевого самоврядування рекомендується посилити контроль за випадками самовільного спалювання залишків рослинності й систематично інформувати землевласників про адміністративну та кримінальну відповідальність за такі дії.

*Також важливим бар'єром є відсутність державної політики щодо*

*використання агробіомаси*. Національна стратегія використання аграрної біомаси для енергетичних потреб фактично не розроблена. Агробіомаса не згадується в Енергетичній стратегії України до 2035 року, а Концепція розвитку сільських територій лише містить загальні положення про підтримку альтернативної енергетики та розвитку ринків збуту біопалива. Рекомендуємо незабаром розробити стратегії використання агробіомаси для потреб енергетики. Варто або включити цю ініціативу до чинних стратегічних документів, або створити окремий документ. Державні органи та профільні міністерства мають визначитися із конкретними обсягами і порядком використання агробіомаси як енергоресурсу.

### **3.3. Економічні та екологічні бар'єри**

Процес заготівлі агробіомаси потребує значних ресурсів і технічних можливостей. Якщо технології тюкування соломи вже більш-менш освоєні, то заготівля інших видів сировини, як-от кукурудзяного стебла, стикається з проблемами через відсутність відповідного обладнання на внутрішньому ринку. Реалізація масштабних проектів біоенергетики також ускладнена через дефіцит технологій для забезпечення безперервної роботи енергообладнання біопаливом.

На сьогодні два котли потужністю по 5 МВт, що працюють на соломі, у птахокомплексі «Дніпровський» залишаються унікальним прикладом реалізації енергообладнання на агробіомасі в Україні. Такі проекти, безумовно, потребують цільової фінансової підтримки для підготовки та впровадження.

Позитивним прикладом у цьому напрямку є запуск Європейським банком реконструкції та розвитку програми FINTECC (Finance and Technology Transfer Centre for Climate Change Framework) в Україні. Ця грантова ініціатива спрямована на стимулювання кліматичних технологій, зокрема підвищення енергоефективності, розвиток відновлюваної

енергетики, скорочення викидів вуглецю та раціонального використання водних ресурсів.

Рекомендації. Вважаю, що діяльність із заготівлі агробіомаси для енергетичних потреб повинна мати державну підтримку. Існує програма компенсації вартості вітчизняної сільськогосподарської техніки через комісію при Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України. Разом із тим, до цього переліку техніки слід долучити й обладнання іноземного виробництва для тюкування стебел кукурудзи, оскільки аналогів такої техніки у нашій країні не існує.

Для сталого розвитку аграрного сектору важливо дотримуватися агрохімічного принципу повернення поживних речовин. Це означає, що поживні елементи, вилучені зі збором урожаю, повинні повертатися до ґрунту. Для балансу гумусу та поживних речовин широко використовуються органічні та мінеральні добрива.

Органічні добрива включають гній, сидерати, гноївку, компости, пташиний послід, залишки кореневої системи, солому, торф тощо. Гній тривалий час був найпоширенішим видом органічних добрив. Однак за останні роки через значне скорочення поголів'я худоби (зокрема ВРХ — майже в 7 разів, свиней — у 3 рази), тому об'єм гною суттєво зменшився. Це негативно вплинуло на рівень внесення органічних добрив — за 20 років кількість добрив на посівну площу знизилася в 17 разів.

У світовій практиці важливе місце займає вирощування сидеральних культур як джерела поповнення ґрунту органічними елементами. В Україні ж ця практика майже не впроваджена — лише близько 300 тис. гектарів (15% можливого обсягу) використовуються під зелені добрива. Водночас багато аграріїв через високі витрати ігнорують належне управління рослинними рештками, а іноді навіть спалюють стерню прямо на полях.

Рекомендую дозволити відчуження 20–40% рослинних решток з полів для енергетичних потреб за умови внесення відповідної кількості

мінеральних добрив (NPK) і дотримання інших рекомендацій по мінімізації негативного впливу. Наприклад, можна пріоритизувати кукурудзиння, а не солому зернових культур, чи повертати золу на поля після її спалювання.

Також потрібно розвивати ринок добрив і ширше використовувати всі види органічних добрив: гній, гноївку, пташиний послід, компости, зброджений субстрат біогазових установок, сидерати тощо. Важливо забезпечити повернення золи з агробіомаси на поля.

Актуальність використання агробіомаси у сфері енергетики пояснюється великим потенціалом сільськогосподарських відходів в Україні. Не використовуючи цей ресурс, неможливо досягти цілей біоенергетики, передбачених Енергетичною стратегією України до 2035 року.

Підводячи підсумки викладено у цьому розділі для подолання бар'єрів при використанні агробіомаси для виробництва енергії в Україні ми пропонуємо:

1. Створити сприятливі умови для агровиробників, які дозволять оновлювати технології збору врожаю з можливістю мінімізувати економічні ризики під час заготівлі рослинних залишків.

2. На основі прогресивного зарубіжного досвіду розробити базові методи та підходи до організації ланцюжків «заготівля-постачання», адаптованих до вітчизняної специфіки та типів агробіомаси.

3. Використовувати сучасне спеціалізоване обладнання для спалювання агробіомаси, дотримуючись оптимальних режимів роботи та вимог до якості палива.

4. Якнайшвидше ухвалити відповідний закон і запустити електронну систему торгівлі біопаливом.

5. Забезпечити умови, за яких спалювання агробіомаси на полях стане не вигідним через впровадження інших, економічно обґрунтованих способів очищення полів від залишків.

6. Розробити стратегію використання сільськогосподарської біомаси для енергетичних цілей або стратегію розвитку біоенергетики в Україні із детальним розділом, присвяченим агробіомасі.

7. Профільним міністерствам підготувати рекомендації щодо обсягів вилучення побічної продукції рослинництва для енергетичного виробництва.

8. Регулярно проводити інформаційні кампанії про переваги та можливості використання біомаси для виробництва енергії, включаючи організацію технічних поїздок на успішні об'єкти в Україні та ЄС для зацікавлених сторін.

9. Запровадити державну фінансову підтримку або спеціальні кредитні лінії для компаній, що займаються заготівлею та постачанням агробіомаси для енергетики.

10. Розвивати ринок органічних добрив, таких як гній, пташиний послід, гноївка, компости, зелена маса та продукти переробки з біогазових установок, а також сприяти поверненню золи від спалювання агробіомаси у ґрунт як добрива.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У сфері виробництва біопалива існує низка ефективних рішень, які забезпечують високу продуктивність за зменшення витрат і з дотриманням принципів екологічної стійкості. З робочого аналізу виділено такі ключові аспекти:

1. Біомаса є стабільним і поновлюваним джерелом енергії, а вирощування спеціальних енергетичних рослин створює безперервний потік сировини для виробництва біопалива.

2. Лігноцелюозна сільськогосподарська біомаса має значний потенціал за правильного використання технологій попередньої обробки для покращення гідролізу та розпаду лігноцелюлози. Цей етап критично важливий для перетворення на прості цукри, які далі служать для бродіння або іншої переробки в біопаливо.

3. Вибір найефективнішого методу виробництва біопалива залежить від здатності максимізувати вихід продукції за мінімальних витрат у межах екологічно безпечної системи.

4. Використання біомаси для палива сприяє зниженню вуглецевих викидів порівняно з традиційними видами палива, оскільки рослини-попередники поглинають CO<sub>2</sub> у процесі росту, що зменшує загальний вуглецевий слід.

## ПРОПОЗИЦІЯ

Виробництво біопалива з біомаси вимагає подальших інновацій у сферах вирощування, збору врожаю та переробки сировини, що дозволить підвищити ефективність і конкурентоспроможність.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біопаливо: ефективність його виробництва та споживання в АПК України: навч. посіб. / Г. М. Калетнік, В. М. Пришляк. К. : Хай-Тек Прес, 2011. 312 с. : іл.
2. Комплексне використання сировини для виробництва твердого біопалива деревообробними підприємствами: обліково-аналітичний аспект: монографія / Ю. В. Максимів; М-во освіти і науки України, ДВНЗ «Прикарпат. нац. ун-т ім. Василя Стефаника». Івано-Франківськ: Друкарня Фоліант, 2015. 186 с. ISBN 978-966-2988-73-4.
3. Dincer I. Renewable energy and sustainable development: A crucial review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2000. 4 (2). P. 157–175.
4. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів : монографія / Клименко В. В. [та ін.]; Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2017. 161 с.:
5. Østergaard P.A., Duic N., Noorollahi Y., Mikulcic H., Kalogirou S. Sustainable development using renewable energy technology. *Renew. Energy.* 2020. 146. P. 2430–2437.
6. Singh B.R., Singh, O. Global trends of fossil fuel reserves and climate change in the 21st century. In: *Fossil Fuel and the Environment.* 2012.
7. Kazemi Shariat Panahi, Kinder J.E., Ezeji T.C., A review on green liquid fuels for the transportation sector: A prospect of microbial solutions to climate change. *Biofuel Res. J.* 2019. 6 (3). P. 995–1024.
8. Sarwal R., Kumar S., Mehta A., et al. Roadmap for ethanol blending in India 2020-25. *OSF Prepr.* 2021. P. 1–72. <http://dx.doi.org/10.31219/osf.io/825mz>.
9. Woiciechowski A.L., Neto C.J., de Souza Vandenberghe LP. et al. Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance—conventional processing and recent advances. *Bioresour. Technol.* 2020. 304. 122848.
10. Parakh P.D., Nanda S., Kozinski J.A. Eco-friendly transformation of

waste biomass to biofuels. *Curr. Biochem. Eng.* 2020. 6 (2). P. 120–134.

11. Panahi H.K., Dehghani M., Aghbashlo M., Karimi K., Tabatabaei M. Conversion of residues from agro-food industry into bioethanol in Iran: An under-valued biofuel additive to phase out MTBE. *Energy* 2020. 145, P. 699–710.

12. Alalwan H.A., Alminshid A.H., Aljaafari, H.A. Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renew. Focus* 2019. 28, P. 127–139.

13. Bhatia S.K., Kim S.H., Yoon J.J., Yang Y.H., Current status and strategies for second generation biofuel production using microbial systems. *Energy Convers. Manage.* 2017. 148, P. 1142–1156.

14. Chowdhury H., Loganathan B. Third-generation biofuels from microalgae: A review. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2019. 20, P. 39–44.

15. Abdullah B., Muhammad S.A., Shokravi Z., et al. Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019. 107, P. 37–50.

16. Ferreira, J.A., Taherzadeh, M.J., Improving the economy of lignocellulose-based biorefineries with organosolv pretreatment. *Bioresour. Technol.* 2020. 299, P. 122695.

17. Ciria Barro Biomass resource assessment. *Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining.* Woodhead Publishing, 2016. pp. 53–83.

18. Deshavath N.N., Veeranki V.D., Goud V.V. Chapter 1 - lignocellulosic feedstocks for the production of bioethanol: Availability, structure, and composition. *Sustain. Bioenergy* 2019. P. 1–19.

19. Waliszewska B., Mleczek M., Zborowska M., Goliński P., Rutkowski P., Szentner K., Changes in the chemical composition and the structure of cellulose and lignin in elm wood exposed to various forms of arsenic. *Cellulose.* 2019. 26 (10), P. 6303–6315.

20. Tosuner Z.V., Taylan G.G., Özmihçı S. Effects of rice husk particle size on biohydrogen production under solid state fermentation. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2019. 44 (34), P. 18785–18791.

21. Han S.Y., Park C.W., Kwon G.J., Kim N.H., Kim J.C., Lee S.H.

Ionic liquid pretreatment of lignocellulosic biomass. *J. Forest Environ. Sci.* 2020. 36 (2), P. 69–77.

22. Haghghi Mood S., Hossein Golfeshan A., Tabatabaei M., et al. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013. 17, P. 77–93.

23. Kamusoko R., Jingura R.M., Parawira W., Sanyika W.T., Comparison of pretreatment methods that enhance biomethane production from crop residues-a systematic review. *Biofuel Res. J.* 2019. 6 (4), P. 1080.

24. Pascualone M.J. Fermentative biohydrogen production from a novel combination of vermicompost as inoculum and mild heat-pretreated fruit and vegetable waste. *Biofuel Res. J.* 2019. 6 (3), P. 1046.

25. Sadh P.K., Duhan S., Duhan J.S. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: A review. *Bioresour. Bioprocess.* 2018. 5 (1), P. 1–5.

26. Abu Yazid N., Barrena R., Komilis D., Sánchez A. Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: A review. *Sustainability.* 2017. 9 (2), 224

27. Efunwoye O.O., Oluwole O.R.. Bioethanol production from pineapple waste by solid state fermentation method. *Niger. J. Microbiol.* 2019. 33 (2), P. 4811–4820.

28. Tosuner Z.V., Taylan G.G., Özmihçı S. Effects of rice husk particle size on biohydrogen production under solid state fermentation. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2019. 44 (34), P. 18785–18791.

29. Lamichhane G., Acharya A., Poudel D.K., et al. Recent advances in bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Int. J. Green Energy.* 2021. 18 (7), P. 731–744.

30. Hazeena S.H., Salini C.N., Sindhu R., Pandey A., Binod P. Simultaneous saccharification and fermentation of oil palm frond for the production of 2, 3-butanediol. *Bioresour. Technol.* 2019. 278, P. 145–149.

31. Lamichhane G., Acharya A., Poudel D.K., et al. Recent advances in

bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Int. J. Green Energy*. 2021. 18 (7), P. 731–744.

32. Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D.L., Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* 2008. 99 (17), P. 7928–7940.

33. Sawatdeenarunat C., Surendra K.C., Takara D., Oechsner H., Khanal S.K., Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresour. Technol.* 2015. 178, P. 178–186.

34. Tabatabaei M., Aghbashlo M., Valijanian E., et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, part 1: Upstream strategies. *Renew. Energy*. 2020. 146, P. 1204–1220.

35. Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D.L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* 2008. 99 (17), P. 7928–7940.

36. Volpe R., Zabaniotou A.A., Skoulou V. Synergistic effects between lignin and cellulose during pyrolysis of agricultural waste. *Energy Fuels*. 2018. 32 (8), P. 8420–8430.

37. Hu X., Gholizadeh M. Progress of the applications of bio-oil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020. 134, P. 110124.

38. Li P., He C., Li G., Ding P., Lan M., Gao Z., Jiao Y. Biological pretreatment of corn straw for enhancing degradation efficiency and biogas production. *Bioengineered*. 2020. 11 (1), P. 251–260.

39. Kumar R., Kumar P. Future microbial applications for bioenergy production: A perspective. *Front. Microbiol.* 2017. 8, P. 450.

40. Ivase T.J., Nyakuma B.B., Oladokun O., Abu P.T., Hassan M.N. Review of the principal mechanisms, prospects, and challenges of bioelectrochemical systems. *Environ. Prog. Sustain. Energy*. 2019. 13298.

41. Li S., Chen G., Anandhi A. Applications of emerging bioelectrochemical technologies in agricultural systems: A current review. *Energies* 2018. 11 (11), 2951.

42. Chen X., Zhang Y., Gu Y., Liu Z., Shen Z., Chu H., Zhou X.  
Enhancing methane production from rice straw by extrusion pretreatment.  
Appl. Energy 2014. 122, P. 34–41.