

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет водогосподарської інженерії та екології

Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Зав. кафедрою екології

доц. \_\_\_\_\_ Вікторія КАЦЕВИЧ

« \_\_\_\_\_ » грудня 2025р.

**Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «магістр»  
на тему: «**Екологічний моніторинг та аналіз перспектив розвитку  
виробництва біопалива в Україні**»

Виконав: здобувач вищої освіти 2 курсу,

групи МгЕ-1-24 спеціальності

101 «Екологія»

\_\_\_\_\_ Рустам ЛЕЩЕНКО

Керівник \_\_\_\_\_ ст. викл. Олена КАРАСЬ

Рецензент \_\_\_\_\_

Дніпро – 2025 рік

# ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет:** Водогосподарської інженерії та екології

**Кафедра:** Екології

**Освітньо-професійна програма:** «Екологія»

**Спеціальність:** 101 «Екологія»

**Ступінь вищої освіти:** Магістр

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою екології

\_\_\_\_\_ Вікторія КАЦЕВИЧ

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

на підготовку кваліфікаційної роботи

Лещенку Рустаму Батировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** «Екологічний моніторинг та аналіз перспектив розвитку виробництва біопалива в Україні»

**Науковий керівник** Карась О.Г., к.б.н., ст. викладачка

затверджена наказом по ДДАЕУ від «15» жовтня 2025 р. № 3074

**2. Термін подання здобувачем роботи:** 16.12.2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи:** Нормативно-правові акти України та міжнародні документи у сфері охорони довкілля, енергетики, відновлюваних джерел енергії, управління відходами та скорочення викидів парникових газів, статистичні дані державних органів влади щодо обсягів виробництва та споживання біопалива, використання біомаси, структури енергетичного балансу та викидів забруднювальних речовин

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):** 1. Теоретичні та методологічні засади екологічного моніторингу виробництва біопалива. 2. Методика та інструментарій екологічного моніторингу виробництва біопалива. 3. Аналіз сучасного стану та екологічних аспектів виробництва біопалива в Україні. 4. Оцінка екологічної ефективності та ресурсного потенціалу виробництва біопалива. 5. Перспективи розвитку виробництва біопалива та удосконалення

системи екологічного моніторингу. 6. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

**5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Презентація в Power Point (актуальність, мета, об'єкт, предмет та задачі досліджень, отримані результати, висновки та рекомендації).**

**6. Дата видачі завдання: «15» жовтня 2025р.**

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	15.10.2025 р. – 17.10.2025 р.	виконано
2	Теоретичні та методологічні засади екологічного моніторингу виробництва біопалива	20.10.2025 р. – 31.10.2025 р.	виконано
3	Методика та інструментарій екологічного моніторингу виробництва біопалива	03.11.2025 р. – 14.11.2025 р.	виконано
4	Аналіз сучасного стану та екологічних аспектів виробництва біопалива в Україні	03.11.2025 р. – 14.11.2025 р.	виконано
5	Оцінка екологічної ефективності та ресурсного потенціалу виробництва біопалива	17.11.2025 р. – 28.11.2025 р.	виконано
6	Перспективи розвитку виробництва біопалива та удосконалення системи екологічного моніторингу	28.11.2025 р. – 02.12.2025 р.	виконано
7	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	02.12.2025 р. – 05.12.2025 р.	виконано
8	Висновки Список використаних джерел	5.12.2025 р. – 10.12.2025 р.	виконано

Здобувач (ка)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рустам ЛЕЩЕНКО

(Ім'я та прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олена КАРАСЬ

(Ім'я та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота виконана на 76 сторінках, 10 таблиць і 146 використаних джерел літератури.

*Мета* — оцінка екологічної ефективності виробництва біопалива в Україні на основі екологічного моніторингу та обґрунтування перспектив розвитку біопаливної галузі з урахуванням екологічних, економічних і соціальних чинників.

*Об'єкт дослідження* – процеси виробництва біопалива та їх вплив на компоненти навколишнього природного середовища в Україні.

*Предмет дослідження* – екологічний моніторинг виробництва біопалива, методи оцінювання його впливу на компоненти довкілля та екологічна ефективність заміщення викопного палива біопаливом в Україні.

*Завдання:* проаналізувати теоретичні та методологічні засади екологічного моніторингу у сфері виробництва біопалива; дослідити сучасний стан, структуру та динаміку розвитку біопаливної галузі в Україні; охарактеризувати основні види біопалива та технології їх виробництва; проаналізувати нормативно-правове забезпечення екологічного моніторингу та регулювання біопаливної діяльності в Україні; обґрунтувати систему екологічних показників і методи оцінювання впливу біопаливного виробництва на компоненти довкілля; оцінити ресурсний потенціал біомаси в Україні для розвитку виробництва біопалива; здійснити порівняльний аналіз екологічної та енергетичної ефективності біопалива і викопних енергоносіїв; визначити перспективні напрями розвитку біопаливної галузі в Україні; розробити пропозиції щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу виробництва біопалива.

*Ключові слова:* органічні відходи, управління відходами, біопаливо, біоенергетика, технології переробки органічних відходів, сталий розвиток, циркулярна економіка, екологічний моніторинг

## ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА	10
1.1	Сутність, мета та завдання екологічного моніторингу в енергетичній сфері	10
1.2	Біопаливо як об'єкт екологічного моніторингу та екологічної оцінки	12
1.3	Класифікація біопалива та основні технології його виробництва	14
1.4	Нормативно-правове регулювання екологічного моніторингу та біопаливної галузі в Україні	17
2	МЕТОДИКА ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА	20
2.1	Система екологічних показників моніторингу біопаливного виробництва	20
2.2	Методи оцінювання впливу біопаливних підприємств на компоненти довкілля	23
2.3	Інформаційне забезпечення та аналітичні методи обробки моніторингових даних	26
2.4	Роль екологічного моніторингу у забезпеченні сталого розвитку біоенергетики	28
3	АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА В УКРАЇНІ	31
3.1	Поточний стан та динаміка розвитку виробництва біопалива в Україні	31
3.2	Екологічна характеристика основних видів біопалива, що виробляються в Україні	33
3.3	Оцінка впливу біопаливного виробництва на довкілля	36
3.4	SWOT-аналіз перспектив розвитку біопаливної галузі України	38
4	ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА	41
4.1	Розрахунок скорочення викидів парникових газів при використанні біопалива	41
4.2	Порівняльна екологічна ефективність біопалива та традиційних видів палива	43
4.3	Оцінка ресурсного потенціалу біомаси для виробництва біопалива в Україні	46

4.4	Аналіз екологічних та енергетичних переваг заміщення викопного палива біопаливом	48
5	ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ	51
5.1	Перспективні напрями розвитку біопаливної галузі в Україні	51
5.2	Пропозиції щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу виробництва біопалива	53
5.3	Екологічні, економічні та соціальні ефекти розвитку біоенергетики	55
6	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
6.1	Загальні положення з охорони праці на підприємствах з виробництва біопалива	58
6.2	Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	60
6.3	Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці	62
6.4	Пожежна безпека та дії персоналу у надзвичайних ситуаціях	64
	ВИСНОВКИ	66
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується загостренням енергетичних та екологічних проблем, що зумовлені вичерпністю викопних паливних ресурсів, зростанням антропогенного навантаження на довкілля та посиленням кліматичних змін [1, 2]. У цих умовах особливої актуальності набуває пошук альтернативних, відновлюваних і екологічно безпечніших джерел енергії, здатних забезпечити енергетичну безпеку держави та зменшити негативний вплив енергетичного сектору на навколишнє природне середовище [3].

Одним із перспективних напрямів розвитку відновлюваної енергетики є виробництво та використання біопалива, яке розглядається як важливий елемент декарбонізації економіки та виконання міжнародних кліматичних зобов'язань [4, 5]. Біопаливо дозволяє частково замістити традиційні види палива, зменшуючи обсяги викидів парникових газів і сприяючи більш раціональному використанню біологічних ресурсів [6].

Для України розвиток біоенергетики має особливе значення з огляду на високий аграрний потенціал, наявність значних обсягів рослинних відходів та побічної продукції сільського господарства, а також необхідність підвищення енергетичної незалежності держави [7, 8]. Водночас виробництво біопалива пов'язане з використанням земельних, водних і біологічних ресурсів, що зумовлює потребу в постійному контролі екологічних наслідків такої діяльності [9].

Ключову роль у забезпеченні екологічної безпеки біопаливного виробництва відіграє екологічний моніторинг, який являє собою систему регулярних спостережень, оцінювання та прогнозування стану довкілля в зоні впливу господарської діяльності [10]. Застосування екологічного

моніторингу дозволяє своєчасно виявляти негативні впливи на компоненти навколишнього природного середовища, а також оцінювати ефективність природоохоронних заходів [11].

Незважаючи на наявність наукових досліджень у сфері біоенергетики, питання комплексного поєднання екологічного моніторингу з аналізом перспектив розвитку виробництва біопалива в Україні залишається недостатньо опрацьованим. Особливої уваги потребує оцінка екологічного ефекту від скорочення викидів парникових газів, аналіз ресурсного потенціалу біомаси та вдосконалення системи екологічного контролю відповідно до сучасних викликів і євроінтеграційних процесів [12-15].

*Метою кваліфікаційної роботи є оцінка екологічної ефективності виробництва біопалива в Україні на основі екологічного моніторингу та обґрунтування перспектив розвитку біопаливної галузі з урахуванням екологічних, економічних і соціальних чинників.*

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено вирішення таких завдань:

- проаналізувати теоретичні та методологічні засади екологічного моніторингу у сфері виробництва біопалива;
- дослідити сучасний стан, структуру та динаміку розвитку біопаливної галузі в Україні;
- охарактеризувати основні види біопалива та технології їх виробництва з позицій екологічної оцінки;
- проаналізувати нормативно-правове забезпечення екологічного моніторингу та регулювання біопаливної діяльності в Україні;
- обґрунтувати систему екологічних показників і методи оцінювання впливу біопаливного виробництва на компоненти довкілля;
- оцінити ресурсний потенціал біомаси в Україні для розвитку виробництва біопалива;
- здійснити порівняльний аналіз екологічної та енергетичної ефективності біопалива і викопних енергоносіїв;

- визначити перспективні напрями розвитку біопаливної галузі в Україні;
- розробити пропозиції щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу виробництва біопалива.

*Об'єктом дослідження* є процеси виробництва біопалива та їх вплив на компоненти навколишнього природного середовища в Україні.

*Предметом дослідження* є екологічний моніторинг виробництва біопалива, методи оцінювання його впливу на компоненти довкілля та екологічна ефективність заміщення викопного палива біопаливом в Україні.

Робота є актуальною та має важливе наукове і практичне значення, оскільки спрямована на обґрунтування екологічно безпечного розвитку біопаливної галузі в Україні на основі системного екологічного моніторингу та аналітичної оцінки перспектив її розвитку.

## 1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА

### 1.1 Сутність, мета та завдання екологічного моніторингу в енергетичній сфері

Енергетична сфера належить до базових складових економічного розвитку будь-якої держави та водночас є одним із найбільш потужних джерел антропогенного впливу на навколишнє природне середовище. Процеси виробництва, перетворення та споживання енергії супроводжуються викидами забруднювальних речовин в атмосферне повітря, утворенням відходів, споживанням водних і земельних ресурсів, а також зміною природних екосистем [16]. У зв'язку з цим забезпечення екологічної безпеки енергетичного сектору є одним із пріоритетних завдань сучасної екологічної політики.

Екологічний моніторинг у енергетичній сфері розглядається як системна та безперервна діяльність, спрямована на отримання достовірної інформації про стан навколишнього природного середовища в зоні впливу енергетичних об'єктів. Він охоплює спостереження за якістю атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод, ґрунтів, а також за станом біоти та здоров'ям населення [17]. На відміну від разових екологічних досліджень, моніторинг передбачає регулярність, порівнянність даних у часі та можливість оцінки довгострокових тенденцій.

Сутність екологічного моніторингу полягає не лише у фіксації фактичного стану довкілля, але й у виявленні причинно-наслідкових зв'язків між господарською діяльністю та екологічними змінами. У енергетичній сфері це дозволяє оцінювати вплив різних джерел енергії, порівнювати екологічну ефективність традиційних і відновлюваних енергетичних

технологій, а також обґрунтовувати вибір екологічно доцільних напрямів розвитку галузі [18].

Метою екологічного моніторингу в енергетичній сфері є забезпечення науково обґрунтованої інформаційної бази для прийняття управлінських рішень, спрямованих на зниження негативного впливу енергетичного виробництва на довкілля та здоров'я населення. Особливе значення це має в умовах переходу до низьковуглецевої економіки, коли екологічні критерії стають визначальними при формуванні енергетичної стратегії держави [19].

У сфері виробництва біопалива екологічний моніторинг виконує специфічну функцію підтвердження екологічної доцільності використання біоенергетичних ресурсів. Біопаливо традиційно розглядається як більш екологічно безпечна альтернатива викопному паливу, однак його виробництво може супроводжуватися локальними негативними впливами, зокрема деградацією ґрунтів, надмірним використанням водних ресурсів, застосуванням агрохімікатів та утворенням відходів переробки біомаси [20]. Саме тому екологічний моніторинг є необхідною умовою забезпечення сталого розвитку біопаливної галузі.

Основними завданнями екологічного моніторингу в енергетичній сфері є:

- систематичне спостереження за станом компонентів навколишнього природного середовища в зоні впливу енергетичних підприємств;
- кількісна та якісна оцінка викидів забруднювальних речовин і парникових газів;
- контроль використання природних ресурсів та утворення відходів;
- аналіз змін екологічних показників у динаміці;
- прогнозування можливих екологічних наслідків реалізації енергетичних проєктів;
- оцінка ефективності природоохоронних та ресурсозберігаючих заходів [21].

У сучасних умовах екологічний моніторинг в енергетиці набуває комплексного характеру та все частіше інтегрується з підходами оцінки

життєвого циклу продукції, екологічного аудиту та стратегічної екологічної оцінки. Такий підхід дозволяє враховувати не лише прямі, але й опосередковані впливи енергетичної діяльності на довкілля, що є особливо важливим для біопаливних технологій [22].

Таким чином, екологічний моніторинг в енергетичній сфері є важливим інструментом реалізації принципів сталого розвитку, екологічної безпеки та раціонального природокористування. Його впровадження у виробництві біопалива дозволяє забезпечити баланс між енергетичними потребами суспільства та збереженням навколишнього природного середовища, що має особливе значення для України в умовах трансформації енергетичного сектору [23].

## 1.2 Біопаливо як об'єкт екологічного моніторингу та екологічної оцінки

Біопаливо як складова відновлюваної енергетики є специфічним об'єктом екологічного моніторингу, оскільки його виробництво та використання поєднує як потенційні екологічні переваги, так і ризики для навколишнього природного середовища. На відміну від традиційних викопних видів палива, біопаливо базується на використанні біологічної сировини, що формує інший характер антропогенного впливу та потребує комплексного підходу до оцінювання екологічних наслідків [24].

У наукових дослідженнях біопаливо розглядається не лише як енергетичний продукт, але й як елемент біоекономіки, тісно пов'язаний із сільським господарством, лісовим господарством, управлінням відходами та землекористуванням [25]. Саме ця міжгалузєва природа зумовлює необхідність розширеного екологічного моніторингу, який охоплює всі етапи життєвого циклу біопалива — від вирощування або заготівлі біомаси до кінцевого споживання енергії.

Як об'єкт екологічного моніторингу біопаливо характеризується багатокомпонентністю впливу на довкілля. На етапі виробництва сировини ключовими об'єктами спостережень є стан ґрунтів, водних ресурсів, рівень використання мінеральних добрив і засобів захисту рослин, а також зміни біорізноманіття [26]. У процесі переробки біомаси в біопаливо об'єктами моніторингу виступають викиди в атмосферне повітря, утворення стічних вод і твердих відходів, споживання енергії та води [27].

Особливе місце в екологічній оцінці біопалива займає аналіз викидів парникових газів. На відміну від викопного палива, біопаливо потенційно забезпечує замкнений вуглецевий цикл, оскільки вуглець, що виділяється при його спалюванні, попередньо був поглинутий рослинами в процесі фотосинтезу [28]. Водночас реальний екологічний ефект залежить від технології виробництва, джерела сировини, енергетичних витрат та логістики, що робить необхідним детальний моніторинг усіх стадій виробничого процесу.

Екологічна оцінка біопалива ґрунтується на використанні системи показників, які дозволяють кількісно визначити його вплив на довкілля. До таких показників належать обсяги викидів  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  та  $\text{N}_2\text{O}$ , рівень споживання водних і земельних ресурсів, утворення відходів, а також показники деградації ґрунтів і зміни землекористування [29]. Комплексне застосування цих показників дозволяє об'єктивно оцінити екологічну доцільність виробництва різних видів біопалива.

Важливим інструментом екологічної оцінки біопалива є підхід оцінки життєвого циклу, який дає змогу врахувати сукупний екологічний вплив продукції на всіх етапах її існування [30]. У контексті екологічного моніторингу цей підхід дозволяє перейти від локального контролю окремих викидів до системного аналізу екологічної ефективності біопаливних технологій у порівнянні з традиційними джерелами енергії.

Для України біопаливо як об'єкт екологічного моніторингу має особливу значущість у зв'язку з високим потенціалом використання аграрної

біомаси та необхідністю запобігання негативним екологічним наслідкам інтенсифікації сільськогосподарського виробництва [31]. Відсутність належного моніторингу може призвести до виснаження ґрунтів, порушення водного балансу та зниження екологічної стійкості агроландшафтів.

Таким чином, біопаливо як об'єкт екологічного моніторингу та екологічної оцінки потребує комплексного, системного та науково обґрунтованого підходу. Ефективна система моніторингу дозволяє не лише мінімізувати потенційні екологічні ризики, але й підтвердити екологічні переваги біоенергетики, забезпечуючи її сталий розвиток у довгостроковій перспективі [32].

### 1.3 Класифікація біопалива та основні технології його виробництва

Біопаливо є різномірною групою енергетичних продуктів, що отримуються з біологічної сировини рослинного або тваринного походження. Його класифікація базується на походженні сировини, агрегатному стані палива, технологіях виробництва та рівні технологічного розвитку. Такий поділ має важливе значення для екологічного моніторингу, оскільки різні види біопалива характеризуються специфічними екологічними впливами та потребують застосування відмінних підходів до екологічної оцінки [33].

Найбільш поширеним є поділ біопалива за агрегатним станом на тверде, рідке та газоподібне. Кожна з цих груп має власні джерела сировини, технології виробництва та напрями використання в енергетичному секторі [34].

*Тверде біопаливо* включає дрова, тріску, пелети та брикети, які виробляються переважно з деревної біомаси або аграрних відходів. Воно є одним із найбільш доступних видів біопалива в Україні завдяки значним ресурсам лісового та аграрного секторів [35].

*Рідке біопаливо* представлене насамперед біоетанолом та біодизелем. Біоетанол отримують шляхом ферментації цукровмісної або крохмалевмісної сировини, тоді як біодизель виробляється з рослинних олій або тваринних жирів методом трансестерифікації [36].

*Газоподібне біопаливо* охоплює біогаз і біометан, що утворюються в результаті анаеробного зброджування органічної сировини. Цей вид біопалива має значний потенціал з точки зору комплексного використання відходів та зменшення викидів парникових газів [37].

Окрім цього, у науковій літературі застосовується класифікація біопалива за поколіннями, яка відображає рівень технологічного розвитку та екологічну ефективність біопаливних технологій [38]. Біопаливо першого покоління виробляється з харчових культур, другого — з лігноцелюлозної біомаси та відходів, третього — з водоростей, а четвертого — із застосуванням біотехнологій та технологій уловлювання вуглецю.

Технології виробництва біопалива значною мірою визначають його екологічні характеристики. Для твердого біопалива ключовими процесами є подрібнення, сушіння та пресування біомаси. Ці технології є відносно простими, однак потребують контролю викидів пилу та енергоспоживання [39].

Виробництво біоетанолу базується на біохімічних процесах, які включають підготовку сировини, ферментацію та дистиляцію. Основними екологічними аспектами цього процесу є споживання води, утворення стічних вод та викиди  $\text{CO}_2$  у процесі бродіння [40].

Технологія виробництва біодизелю передбачає хімічну обробку олій з використанням спиртів і каталізаторів. Важливими об'єктами екологічного моніторингу в цьому випадку є утворення побічних продуктів, зокрема гліцерину, та контроль хімічних реагентів [41].

Анаеробне зброджування, що застосовується для виробництва біогазу, є однією з найбільш екологічно ефективних технологій, оскільки поєднує виробництво енергії з утилізацією органічних відходів. Побічним продуктом

цього процесу є дигестат, який може використовуватися як органічне добриво за умови належного екологічного контролю [42].

Для систематизації інформації та подальшого аналізу екологічних аспектів доцільно узагальнити основні види біопалива, сировину та технології їх виробництва у вигляді таблиці (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Класифікація біопалива та основні технології його виробництва

Вид біопалива	Основна сировина	Основна технологія виробництва	Ключові екологічні аспекти
Тверде біопаливо (пелети, брикети)	Деревина, агровідходи	Подрібнення, сушіння, пресування	Викиди пилу, енергоспоживання
Біоетанол	Цукрові та крохмалеві культури	Ферментація, дистиляція	Споживання води, стічні води
Біодизель	Рослинні олії, тваринні жири	Трансестерифікація	Хімічні реагенти, побічні продукти
Біогаз	Органічні відходи, гній, силос	Анаеробне зброджування	Викиди $\text{CH}_4$ , управління дигестатом
Біометан	Біогаз	Очищення та збагачення	Контроль витоків газу

Зазначена класифікація та аналіз технологій виробництва біопалива свідчать, що кожен вид біопалива має власні екологічні переваги та обмеження. Це зумовлює необхідність диференційованого підходу до екологічного моніторингу та оцінки екологічної ефективності біопаливних технологій, що є важливим для формування сталих напрямів розвитку біоенергетики в Україні [43].

#### 1.4 Нормативно-правове регулювання екологічного моніторингу та біопаливної галузі в Україні

Нормативно-правове регулювання екологічного моніторингу та розвитку біопаливної галузі є основою формування державної політики у сфері екологічної безпеки та відновлюваної енергетики. В Україні ця система ґрунтується на поєднанні екологічного, енергетичного та аграрного законодавства, а також на міжнародних зобов'язаннях держави у сфері охорони довкілля та кліматичної політики [44].

Базовим нормативним актом, що визначає правові засади охорони навколишнього природного середовища, є Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». У ньому закріплено принципи пріоритетності екологічної безпеки, обов'язковості екологічного контролю та відповідальності за порушення природоохоронного законодавства, що безпосередньо стосується діяльності підприємств енергетичного сектору, у тому числі біопаливних [45].

Важливу роль у нормативному забезпеченні екологічного моніторингу відіграє система спеціальних законів і підзаконних актів, які регулюють контроль за станом окремих компонентів довкілля. До них належать законодавчі акти у сфері охорони атмосферного повітря, використання водних ресурсів, поводження з відходами та охорони земель. Сукупно ці документи формують правову основу для здійснення спостережень, збору екологічної інформації та оцінювання впливу господарської діяльності на довкілля [46].

Нормативно-правове регулювання біопаливної галузі в Україні базується на положеннях законодавства у сфері альтернативних видів палива та відновлюваних джерел енергії. Закон України «Про альтернативні види палива» визначає правові та економічні засади виробництва і використання біопалива, а також передбачає заходи державного стимулювання розвитку

цієї галузі [47]. У свою чергу, Закон України «Про альтернативні джерела енергії» закріплює стратегічні напрями розвитку відновлюваної енергетики, включаючи біоенергетику, з урахуванням екологічних вимог [48].

Окреме місце у системі нормативно-правового регулювання посідають документи стратегічного планування, зокрема енергетична стратегія України та національні плани дій у сфері відновлюваної енергетики. У цих документах розвиток біопаливної галузі розглядається як важливий інструмент підвищення енергетичної незалежності, скорочення викидів парникових газів та досягнення кліматичних цілей [49]. Водночас у стратегічних документах наголошується на необхідності дотримання екологічних вимог і впровадження ефективного екологічного моніторингу.

Значний вплив на формування національного законодавства у сфері біоенергетики має процес євроінтеграції України. Адаптація національних норм до законодавства Європейського Союзу передбачає імплементацію вимог щодо сталості біопалива, скорочення викидів парникових газів та обов'язкового екологічного контролю на всіх етапах життєвого циклу біопаливної продукції [50]. Це зумовлює поступовий перехід від декларативних екологічних вимог до кількісних критеріїв екологічної ефективності.

Важливим елементом нормативно-правового регулювання є процедура оцінки впливу на довкілля, яка застосовується до об'єктів біопаливного виробництва. Проведення такої оцінки дозволяє ще на етапі планування діяльності визначити потенційні екологічні ризики та сформулювати умови для їх мінімізації, що є невід'ємною складовою системи екологічного моніторингу [51].

Таким чином, нормативно-правове регулювання екологічного моніторингу та біопаливної галузі в Україні характеризується багаторівневістю та міжгалузевим характером. Подальший розвиток цієї системи пов'язаний із гармонізацією національного законодавства з європейськими стандартами, посиленням ролі екологічного моніторингу та

впровадженням комплексного підходу до оцінки екологічної ефективності біопаливних технологій, що є передумовою сталого розвитку біоенергетики в Україні [52].

## 2 МЕТОДИКА ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА

### 2.1 Система екологічних показників моніторингу біопаливного виробництва

Ефективність екологічного моніторингу виробництва біопалива значною мірою визначається правильно сформованою системою екологічних показників, які дозволяють кількісно та якісно оцінити вплив біопаливних технологій на навколишнє природне середовище. Система показників має бути комплексною, репрезентативною та адаптованою до специфіки біопаливного виробництва, що охоплює різні стадії життєвого циклу продукції — від заготівлі біомаси до використання готового палива [53].

У загальному вигляді екологічні показники моніторингу біопаливного виробництва доцільно поділяти на кілька взаємопов'язаних груп: показники впливу на атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, показники ресурсоспоживання та утворення відходів, а також інтегральні показники екологічної ефективності [54]. Такий підхід дозволяє оцінювати як окремі компоненти довкілля, так і сумарний екологічний ефект функціонування біопаливних підприємств.

#### *Показники впливу на атмосферне повітря*

Одним із ключових напрямів екологічного моніторингу є контроль викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря. Для біопаливного виробництва особливе значення мають показники викидів парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), метану ( $\text{CH}_4$ ) та закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), які формуються як у процесі переробки біомаси, так і під час спалювання біопалива [55]. Крім того, здійснюється контроль викидів оксидів азоту, оксиду вуглецю, твердих частинок та летких органічних сполук.

Оцінка цих показників дозволяє визначити екологічну доцільність заміщення традиційних видів палива біопаливом та є основою для подальших розрахунків скорочення викидів парникових газів.

#### *Показники використання та якості водних ресурсів*

Виробництво біопалива, особливо рідких його видів, супроводжується значним споживанням води та утворенням стічних вод. У системі екологічного моніторингу використовуються показники загального водоспоживання, питомих витрат води на одиницю продукції, а також показники якості стічних вод, зокрема біохімічне та хімічне споживання кисню, вміст завислих речовин і поживних елементів [56]. Аналіз цих показників є необхідним для оцінки навантаження на водні екосистеми та ефективності очисних споруд.

#### *Показники впливу на ґрунти та землекористування*

Для біопаливного виробництва, що базується на використанні аграрної біомаси, важливим є моніторинг стану ґрунтів і землекористування. До основних показників належать площі земель, залучених до вирощування енергетичних культур, рівень родючості ґрунтів, вміст органічної речовини, а також показники ерозійних процесів [57]. Ці дані дозволяють оцінити довгострокову екологічну стійкість біопаливного виробництва.

#### *Показники ресурсоспоживання та утворення відходів*

Система екологічних показників також включає показники споживання енергетичних і матеріальних ресурсів, а також обсяги утворення відходів. Для біопаливних підприємств важливими є питомі енерговитрати, коефіцієнт корисного використання біомаси, обсяги утворення побічних продуктів і можливості їх повторного використання [58]. Аналіз цих показників сприяє підвищенню ресурсоефективності та зменшенню екологічного навантаження.

#### **Інтегральні показники екологічної ефективності**

Для узагальненої оцінки екологічного впливу біопаливного виробництва застосовуються інтегральні показники, які поєднують декілька екологічних параметрів. До них належать показники скорочення викидів

парникових газів на одиницю енергії, екологічна ефективність заміщення викопного палива, а також результати оцінки життєвого циклу біопалива [59]. Використання таких показників дозволяє порівнювати різні види біопалива між собою та з традиційними джерелами енергії.

Для наочності та подальшого практичного застосування система екологічних показників моніторингу біопаливного виробництва узагальнена у таблиці (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Основні групи екологічних показників моніторингу біопаливного виробництва

<b>Група показників</b>	<b>Характерні показники</b>	<b>Екологічне значення</b>
Атмосферне повітря	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> , тверді частинки	Оцінка впливу на клімат та якість повітря
Водні ресурси	Водоспоживання, БСК, ХСК, завислі речовини	Навантаження на водні екосистеми
Ґрунти та землі	Родючість, вміст гумусу, площі землекористування	Стійкість агроекосистем
Ресурси та відходи	Енерговитрати, відходи, побічні продукти	Ресурсоефективність
Інтегральні	Скорочення викидів, LCA-показники	Загальна екологічна ефективність

Таким чином, система екологічних показників моніторингу біопаливного виробництва є основою для комплексної оцінки впливу біоенергетичних технологій на довкілля. Її застосування дозволяє не лише здійснювати поточний екологічний контроль, але й формувати аналітичну базу для прогнозування екологічних наслідків та обґрунтування перспектив розвитку біопаливної галузі в Україні [60].

## 2.2 Методи оцінювання впливу біопаливних підприємств на компоненти довкілля

Оцінювання впливу біопаливних підприємств на компоненти довкілля є ключовим етапом екологічного моніторингу, що дозволяє встановити характер, масштаби та інтенсивність антропогенного навантаження, а також визначити екологічну доцільність функціонування біопаливних виробництв. Методичне забезпечення такої оцінки повинно враховувати специфіку біоенергетичних технологій, багатостадійність виробничих процесів і взаємозв'язок між різними компонентами природного середовища [61].

У сучасній практиці екологічного моніторингу застосовується комплекс взаємодоповнювальних методів, які умовно можна поділити на інструментальні, розрахункові, аналітичні та інтегральні. Їх поєднання забезпечує об'єктивність оцінювання та підвищує достовірність отриманих результатів [62].

### *Інструментальні методи оцінювання*

Інструментальні методи базуються на безпосередніх вимірюваннях параметрів стану навколишнього природного середовища в зоні впливу біопаливних підприємств. До них належать вимірювання концентрацій забруднювальних речовин в атмосферному повітрі, показників якості поверхневих і стічних вод, а також фізико-хімічних властивостей ґрунтів [63]. Ці методи забезпечують отримання первинних даних, які є основою для подальшого аналізу екологічного стану.

Для біопаливних підприємств особливе значення мають вимірювання викидів парникових газів, пилу та газоподібних продуктів згоряння, а також контроль складу стічних вод, що утворюються в процесі переробки біомаси. Інструментальні методи дозволяють виявляти локальні зони підвищеного екологічного навантаження та оцінювати ефективність очисних заходів [64].

### *Розрахункові методи оцінювання*

Розрахункові методи застосовуються для визначення обсягів викидів, скидів і утворення відходів у випадках, коли прямі вимірювання є технічно складними або економічно недоцільними. Вони базуються на використанні нормативних коефіцієнтів, технологічних параметрів обладнання та обсягів виробництва [65]. У біопаливній галузі розрахункові методи широко використовуються для оцінки викидів CO<sub>2</sub>-еквіваленту, питомих енерговитрат і ресурсоспоживання.

Застосування розрахункових методів дозволяє моделювати різні сценарії функціонування біопаливних підприємств і прогнозувати екологічні наслідки їх розвитку. Це є важливим для стратегічного планування та обґрунтування перспектив розширення біопаливного виробництва [66].

### *Аналітичні та порівняльні методи*

Аналітичні методи передбачають обробку та інтерпретацію отриманих даних з використанням статистичних і порівняльних підходів. Вони дозволяють виявляти тенденції змін екологічних показників у часі, встановлювати залежності між інтенсивністю виробництва та рівнем екологічного навантаження, а також порівнювати екологічну ефективність різних біопаливних технологій [67].

Порівняльний аналіз є особливо важливим для оцінки екологічних переваг біопалива порівняно з традиційними видами палива. Він дає змогу кількісно обґрунтувати доцільність заміщення викопних енергоресурсів біоенергетичними та використовується при формуванні рекомендацій щодо розвитку галузі [68].

### *Інтегральні методи та оцінка життєвого циклу*

Інтегральні методи оцінювання спрямовані на узагальнення впливу біопаливного виробництва на довкілля шляхом поєднання окремих екологічних показників у комплексні індекси. Найбільш поширеним інтегральним підходом є метод оцінки життєвого циклу, який дозволяє

врахувати сукупний екологічний вплив біопалива на всіх етапах — від виробництва сировини до кінцевого використання енергії [69].

Застосування оцінки життєвого циклу дає змогу уникнути однобічної оцінки екологічних переваг біопалива та забезпечує об'єктивне порівняння різних енергетичних технологій з точки зору сталого розвитку [70].

Для систематизації методів оцінювання впливу біопаливних підприємств на компоненти довкілля доцільно узагальнити їх у вигляді таблиці (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Основні методи оцінювання впливу біопаливних підприємств на довкілля

<b>Група методів</b>	<b>Характеристика</b>	<b>Основні результати</b>
Інструментальні	Прямі вимірювання параметрів довкілля	Фактичний стан компонентів
Розрахункові	Використання нормативів і коефіцієнтів	Обсяги викидів і скидів
Аналітичні	Статистичний та порівняльний аналіз	Тенденції та закономірності
Інтегральні	Узагальнення екологічних показників	Комплексна екологічна оцінка
LCA-методи	Оцінка життєвого циклу	Сукупний екологічний ефект

Таким чином, методи оцінювання впливу біопаливних підприємств на компоненти довкілля повинні застосовуватися комплексно з урахуванням специфіки технологій, масштабів виробництва та регіональних умов. Поєднання інструментальних, розрахункових та інтегральних методів забезпечує науково обгрунтовану оцінку екологічної ефективності біопаливного виробництва та створює основу для подальших розрахунків і прогнозів у межах даного дослідження [71].

## 2.3 Інформаційне забезпечення та аналітичні методи обробки моніторингових даних

Ефективність екологічного моніторингу біопаливного виробництва значною мірою залежить від якості інформаційного забезпечення та застосування сучасних аналітичних методів обробки даних. Інформаційна складова моніторингу формує основу для прийняття управлінських рішень, оцінювання екологічних ризиків і прогнозування впливу біопаливних підприємств на компоненти довкілля. В умовах зростання обсягів екологічної інформації особливої актуальності набуває систематизація даних і використання цифрових інструментів аналізу [83].

### *Інформаційне забезпечення екологічного моніторингу*

Інформаційне забезпечення екологічного моніторингу біопаливного виробництва охоплює сукупність первинних і вторинних даних, отриманих у процесі спостережень, вимірювань та звітності. До основних джерел інформації належать результати інструментальних вимірювань на підприємствах, дані лабораторних аналізів, матеріали державної статистичної звітності, а також інформація з національних і міжнародних екологічних баз даних [84].

В Україні важливу роль у формуванні інформаційної бази відіграють дані державної системи моніторингу довкілля, матеріали екологічної звітності підприємств, а також результати процедур оцінки впливу на довкілля. Ці джерела дозволяють отримати інформацію про обсяги викидів, скидів, використання ресурсів і стан навколишнього природного середовища в зоні впливу біопаливних об'єктів [85].

### *Використання геоінформаційних систем*

Сучасним інструментом інформаційного забезпечення екологічного моніторингу є геоінформаційні системи, які дозволяють інтегрувати просторові та атрибутивні дані, візуалізувати результати спостережень і аналізувати просторові закономірності екологічних процесів [86]. У

біопаливній галузі ГІС застосовуються для аналізу розміщення біопаливних підприємств, оцінки впливу на прилеглі території, аналізу землекористування та ресурсного потенціалу біомаси.

Використання ГІС сприяє підвищенню наочності результатів моніторингу та забезпечує можливість інтеграції екологічних, економічних і соціальних даних, що є важливим для комплексної оцінки сталого розвитку біоенергетики [87].

#### *Аналітичні методи обробки моніторингових даних*

Аналітична обробка моніторингових даних передбачає застосування статистичних, математичних і порівняльних методів аналізу. Статистичні методи використовуються для оцінки динаміки екологічних показників, виявлення тенденцій і закономірностей змін у часі, а також для визначення взаємозв'язків між інтенсивністю виробництва та рівнем екологічного навантаження [88].

Порівняльні методи дозволяють зіставляти екологічні показники різних біопаливних підприємств, технологій або регіонів, що є основою для оцінки екологічної ефективності та визначення кращих практик у галузі. Такі підходи широко застосовуються при аналізі перспектив розвитку біопаливного виробництва [89].

#### *Моделювання та прогнозування екологічних показників*

Важливим елементом аналітичної обробки даних є використання методів моделювання та прогнозування, які дозволяють оцінити можливі зміни екологічного стану за різних сценаріїв розвитку біопаливної галузі. Моделювання застосовується для прогнозування викидів парникових газів, змін у використанні земельних ресурсів і навантаження на водні екосистеми [90].

Застосування прогнозних методів є особливо актуальним у контексті стратегічного планування розвитку біоенергетики, оскільки дозволяє оцінити довгострокові екологічні наслідки реалізації енергетичних програм та інвестиційних проєктів [91].

Для систематизації інформаційного забезпечення та аналітичних методів обробки моніторингових даних доцільно узагальнити їх у вигляді таблиці.

Таблиця 2.3 – Інформаційні джерела та аналітичні методи екологічного моніторингу біопаливного виробництва

<b>Група інструментів</b>	<b>Характеристика</b>	<b>Практичне значення</b>
Державні бази даних	Статистична та екологічна звітність	Оцінка загального стану довкілля
ГІС	Просторовий аналіз і візуалізація	Аналіз територіального впливу
Статистичні методи	Аналіз динаміки та тенденцій	Виявлення закономірностей
Порівняльний аналіз	Зіставлення показників	Оцінка екологічної ефективності
Моделювання	Прогноз екологічних змін	Обґрунтування перспектив розвитку

Таким чином, інформаційне забезпечення та аналітичні методи обробки моніторингових даних є невід’ємною складовою системи екологічного моніторингу біопаливного виробництва. Їх комплексне застосування дозволяє підвищити достовірність оцінювання впливу біопаливних підприємств на довкілля та сформуванню науково обґрунтованих рекомендацій щодо сталого розвитку біоенергетики в Україні [92].

#### 2.4 Роль екологічного моніторингу у забезпеченні сталого розвитку біоенергетики

Сталий розвиток біоенергетики передбачає збалансоване поєднання енергетичних, екологічних та соціально-економічних інтересів з метою задоволення потреб сучасного суспільства без шкоди для можливостей майбутніх поколінь. У цьому контексті екологічний моніторинг виступає не

лише як інструмент контролю, але й як ключовий елемент управління розвитком біоенергетичної галузі, що забезпечує науково обґрунтоване прийняття рішень [93].

Роль екологічного моніторингу у забезпеченні сталого розвитку біоенергетики полягає насамперед у своєчасному виявленні негативних впливів біопаливного виробництва на довкілля та оцінці ефективності впроваджених природоохоронних заходів. Систематичне спостереження за екологічними показниками дозволяє запобігати накопиченню екологічних ризиків, які можуть нівелювати потенційні переваги використання біопалива як альтернативного джерела енергії [94].

Важливою функцією екологічного моніторингу є забезпечення екологічної збалансованості використання біологічних ресурсів. Біоенергетика тісно пов'язана з аграрним та лісовим секторами, а отже потребує контролю за станом ґрунтів, водних ресурсів і біорізноманіття. Моніторингові дані дозволяють оцінювати допустимі межі використання біомаси, запобігати деградації агроландшафтів і зберігати екологічну стійкість територій [95].

Екологічний моніторинг також відіграє важливу роль у підтвердженні кліматичних переваг біоенергетики. Саме на основі результатів моніторингу та аналітичної обробки даних здійснюється оцінка скорочення викидів парникових газів у порівнянні з традиційними видами палива. Це є ключовим аргументом на користь розвитку біопаливної галузі в контексті реалізації кліматичної політики та виконання міжнародних зобов'язань України [96].

З позицій сталого розвитку екологічний моніторинг виконує інформаційно-аналітичну функцію, яка забезпечує прозорість та підзвітність біоенергетичних проєктів. Наявність достовірних екологічних даних сприяє підвищенню довіри з боку суспільства, органів державної влади та інвесторів, що є важливою передумовою залучення інвестицій у розвиток біоенергетики [97].

У сучасних умовах роль екологічного моніторингу зростає у зв'язку з переходом до інтегрованих підходів управління розвитком енергетичних систем. Поєднання екологічного моніторингу з інструментами стратегічного планування, оцінки життєвого циклу та прогнозування дозволяє формувати довгострокові сценарії розвитку біоенергетики з урахуванням екологічних обмежень і пріоритетів [98].

Для України екологічний моніторинг є особливо важливим у контексті післявоєнного відновлення та трансформації енергетичного сектору. Розвиток біоенергетики може стати одним із драйверів регіонального розвитку та енергетичної безпеки, проте лише за умови дотримання принципів сталого розвитку та ефективного екологічного контролю [99].

Отже, екологічний моніторинг відіграє системоутворюючу роль у забезпеченні сталого розвитку біоенергетики, виконуючи функції контролю, оцінювання, прогнозування та інформаційного забезпечення. Його інтеграція у процеси управління біоенергетичною галуззю є необхідною умовою реалізації екологічно безпечних та економічно ефективних напрямів розвитку виробництва біопалива в Україні [100].

### 3 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА В УКРАЇНІ

#### 3.1 Поточний стан та динаміка розвитку виробництва біопалива в Україні

Розвиток виробництва біопалива в Україні впродовж останніх років характеризується поступовим зростанням ролі біоенергетики в структурі національного енергетичного балансу. Це зумовлено поєднанням кількох чинників, серед яких ключовими є значний аграрний потенціал країни, необхідність підвищення енергетичної безпеки, а також посилення вимог щодо скорочення викидів парникових газів [101].

Україна володіє значними ресурсами біомаси, основу яких становлять відходи сільського господарства, деревна біомаса, а також органічні відходи тваринництва та харчової промисловості. За оцінками профільних установ, технічно досяжний потенціал біомаси дозволяє забезпечити суттєву частку потреб у тепловій та електричній енергії, що створює передумови для розвитку виробництва твердого, рідкого та газоподібного біопалива [102].

У структурі вітчизняної біоенергетики домінує тверде біопаливо, зокрема деревна тріска, пелети та брикети, які використовуються переважно для виробництва теплової енергії. Значна частина цієї продукції орієнтована як на внутрішній ринок, так і на експорт, що зумовлено попитом з боку країн Європейського Союзу [103]. Водночас виробництво рідкого біопалива, зокрема біоетанолу та біодизелю, розвивається повільніше, що пов'язано з економічними, нормативними та технологічними обмеженнями.

Газоподібне біопаливо, представлене біогазом і біометаном, є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку біоенергетики в Україні.

Біогазові установки активно впроваджуються на підприємствах агропромислового комплексу, у тваринництві та на полігонах твердих побутових відходів. Їх розвиток сприяє не лише виробництву енергії, але й вирішенню проблем утилізації органічних відходів і зменшенню викидів метану [104].

Динаміка розвитку біопаливної галузі в Україні має нерівномірний характер. У докризовий період спостерігалось поступове нарощування встановлених потужностей і обсягів виробництва біоенергетичної продукції. Починаючи з 2022 року, розвиток галузі зазнав впливу воєнних дій, порушення логістичних ланцюгів та змін у структурі енергоспоживання. Водночас ці виклики актуалізували роль біоенергетики як децентралізованого джерела енергії, особливо для регіонів і громад [105].

Для узагальнення поточного стану виробництва біопалива в Україні доцільно розглянути структуру біоенергетичного сектору за основними видами біопалива, що наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Структура виробництва біопалива в Україні за основними видами

<b>Вид біопалива</b>	<b>Основна сировина</b>	<b>Основні напрями використання</b>	<b>Поточні тенденції</b>
Тверде біопаливо (пелети, брикети)	Деревина, агровідходи	Теплова енергетика	Стабільне зростання
Біоетанол	Цукрові та крохмалеві культури	Паливні суміші	Повільний розвиток
Біодизель	Рослинні олії	Транспорт	Обмежене виробництво
Біогаз	Органічні відходи, гній	Електро- і теплоенергія	Активне зростання
Біометан	Біогаз	Газотранспортна система	Початковий етап

Аналіз динаміки розвитку виробництва біопалива в Україні свідчить, що найбільш стабільними сегментами залишаються тверде біопаливо та біогаз, тоді як рідкі види біопалива потребують додаткових стимулів з боку державної політики та вдосконалення нормативно-правового регулювання [106].

З екологічної точки зору розвиток біопаливної галузі в Україні має значний потенціал для зменшення антропогенного навантаження на довкілля, проте потребує системного екологічного моніторингу. Нерівномірність розвитку різних сегментів біоенергетики зумовлює необхідність диференційованого підходу до оцінки екологічних аспектів та формування перспективних напрямів розвитку галузі, що буде розглянуто в наступних підрозділах [107].

### 3.2 Екологічна характеристика основних видів біопалива, що виробляються в Україні

Екологічна оцінка основних видів біопалива, що виробляються в Україні, є необхідною складовою аналізу ефективності біоенергетичної галузі, оскільки різні типи біопалива характеризуються відмінними джерелами сировини, технологіями виробництва та рівнем впливу на навколишнє природне середовище. У вітчизняних умовах найбільш поширеними є тверде біопаливо, біогаз, а також рідкі види біопалива, представлені біоетанолом і біодизелем [108].

Тверде біопаливо, зокрема пелети, брикети та деревна тріска, є найбільш масовим видом біопалива в Україні. Його основною екологічною перевагою є використання відновлюваної сировини, зокрема відходів лісового господарства та аграрного сектору, що сприяє зменшенню обсягів відходів і скороченню використання викопного палива [109].

Водночас виробництво та спалювання твердого біопалива супроводжується певними екологічними ризиками, серед яких викиди твердих частинок, оксидів азоту та вплив на стан лісових екосистем у разі нераціональної заготівлі сировини. Тому екологічна ефективність цього виду біопалива значною мірою залежить від джерела біомаси та дотримання принципів сталого лісокористування [110].

Біогаз є одним із найбільш екологічно ефективних видів біопалива, оскільки його виробництво поєднується з утилізацією органічних відходів тваринництва, рослинництва та харчової промисловості. Основною екологічною перевагою біогазу є зменшення викидів метану, який за відсутності переробки потрапляє в атмосферу з органічних відходів [111].

Крім того, побічний продукт біогазового виробництва — дигестат — може використовуватися як органічне добриво, що сприяє замкненню біогенних циклів і зменшенню використання мінеральних добрив. Водночас екологічні ризики пов'язані з можливими витоками газу та необхідністю контролю за застосуванням дигестату на сільськогосподарських угіддях [112].

Біоетанол в Україні виробляється переважно з цукрових і крохмалевмісних культур, що зумовлює як його екологічні переваги, так і обмеження. До позитивних аспектів належить зменшення викидів чадного газу та ароматичних вуглеводнів при використанні біоетанолу в транспорті [113].

Разом з тим вирощування енергетичних культур для виробництва біоетанолу потребує значних площ сільськогосподарських земель, водних ресурсів і агрохімікатів, що може призводити до деградації ґрунтів і конкуренції з продовольчим виробництвом. Тому екологічна доцільність біоетанолу значною мірою залежить від впровадження технологій другого покоління та використання відходів сільського господарства [114].

Біодизель в Україні має обмежене поширення, проте характеризується низкою екологічних переваг у порівнянні з традиційним дизельним паливом.

Його використання сприяє зниженню викидів сірки та твердих частинок, а також частковому скороченню викидів парникових газів [115].

Водночас виробництво біодизелю з рослинних олій може супроводжуватися негативними екологічними наслідками, пов'язаними з інтенсивним землекористуванням та утворенням побічних продуктів. Це зумовлює необхідність застосування екологічного моніторингу на всіх етапах виробничого циклу [116].

Для узагальнення екологічної характеристики основних видів біопалива доцільно здійснити їх порівняльний аналіз, що наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Екологічна характеристика основних видів біопалива в Україні

<b>Вид біопалива</b>	<b>Основні екологічні переваги</b>	<b>Потенційні екологічні ризики</b>
Тверде біопаливо	Відновлюваність, утилізація відходів	Викиди пилу, вплив на ліси
Біогаз / біометан	Скорочення викидів $\text{CH}_4$ , утилізація відходів	Витоки газу, управління дигестатом
Біоетанол	Менші викиди $\text{CO}$ та ароматичних сполук	Землекористування, водні ресурси
Біодизель	Зменшення $\text{SO}_x$ і твердих частинок	Конкуренція за сировину, відходи

Отже, екологічна характеристика основних видів біопалива, що виробляються в Україні, свідчить про наявність значного потенціалу зменшення негативного впливу енергетичного сектору на довкілля. Водночас екологічна ефективність біопалива значною мірою залежить від джерел сировини, технологій виробництва та рівня екологічного моніторингу, що зумовлює необхідність диференційованого підходу до розвитку окремих сегментів біоенергетики [117].

### 3.3 Оцінка впливу біопаливного виробництва на довкілля

Оцінка впливу біопаливного виробництва на довкілля є необхідним етапом аналізу екологічної доцільності розвитку біоенергетики в Україні. Незважаючи на те, що біопаливо розглядається як екологічно безпечніша альтернатива викопним видам палива, його виробництво та використання супроводжуються низкою екологічних впливів, які потребують комплексного аналізу з урахуванням усіх стадій життєвого циклу [118].

У межах даного дослідження оцінка впливу біопаливного виробництва здійснюється за основними компонентами довкілля: атмосферним повітрям, водними ресурсами, ґрунтами та земельними ресурсами, а також з позицій утворення відходів і парникових газів. Такий підхід дозволяє сформулювати цілісне уявлення про екологічні наслідки функціонування біоенергетичних об'єктів [119].

Основним позитивним екологічним ефектом розвитку біопаливного виробництва є скорочення викидів парникових газів у порівнянні з використанням викопного палива. При раціональній організації виробництва біопалива та сталому використанні біомаси вуглецевий баланс може бути близьким до нейтрального, оскільки  $\text{CO}_2$ , що вивільняється під час спалювання біопалива, попередньо був поглинутий рослинами в процесі фотосинтезу [120].

Разом з тим спалювання біопалива, особливо твердих його видів, супроводжується викидами твердих частинок, оксидів азоту та оксиду вуглецю. Рівень цих викидів значною мірою залежить від якості палива, типу обладнання та режимів його експлуатації. Тому екологічний ефект біопаливного виробництва з точки зору якості повітря є неоднозначним і потребує постійного моніторингу [121].

Виробництво біопалива, особливо рідких його видів, пов'язане зі значним водоспоживанням та утворенням стічних вод. Основними екологічними ризиками є забруднення поверхневих вод органічними

речовинами, поживними елементами та залишками хімічних реагентів, що використовуються у виробничих процесах [122].

Для біогазових підприємств актуальним є питання управління рідкою фракцією дигестату, яка за неналежного зберігання може спричиняти забруднення водних об'єктів. Водночас впровадження замкнених водооборотних систем і сучасних очисних технологій дозволяє суттєво зменшити негативний вплив на водні ресурси [123].

Оцінка впливу біопаливного виробництва на ґрунти та землекористування є особливо актуальною для України з огляду на значні площі сільськогосподарських угідь, задіяних у вирощуванні енергетичних культур. Основними ризиками є виснаження ґрунтів, зменшення вмісту органічної речовини та посилення ерозійних процесів у разі інтенсивного землекористування [124].

Разом з тим використання відходів сільського господарства та застосування дигестату як органічного добрива можуть мати позитивний вплив на родючість ґрунтів і сприяти відновленню гумусового балансу. Таким чином, вплив біопаливного виробництва на ґрунти має як негативні, так і позитивні аспекти, що залежать від обраної технології та системи управління [125].

Біопаливне виробництво супроводжується утворенням побічних продуктів, таких як зола, гліцерин, дигестат та інші відходи біологічного походження. За умови належного екологічного контролю ці матеріали можуть бути повторно використані у сільському господарстві або промисловості, що зменшує загальний рівень відходоутворення [126].

Неналежне поводження з побічними продуктами, навпаки, може призводити до вторинного забруднення довкілля, що підкреслює необхідність інтеграції принципів циркулярної економіки у біопаливну галузь [127].

Для систематизації результатів оцінки впливу біопаливного виробництва на довкілля доцільно узагальнити основні екологічні ефекти в таблиці.

Таблиця 3.3 – Узагальнена оцінка впливу біопаливного виробництва на довкілля

<b>Компонент довкілля</b>	<b>Позитивні впливи</b>	<b>Потенційні негативні впливи</b>
Атмосферне повітря	Скорочення викидів CO <sub>2</sub>	Викиди NO <sub>x</sub> , твердих частинок
Водні ресурси	Можливість замкнених циклів	Забруднення стічними водами
Ґрунти та землі	Використання органічних добрив	Виснаження ґрунтів
Відходи	Утилізація біовідходів	Ризик вторинного забруднення

Отже, оцінка впливу біопаливного виробництва на довкілля свідчить, що біоенергетика може забезпечувати суттєві екологічні переваги за умови впровадження ефективної системи екологічного моніторингу та дотримання принципів сталого розвитку. Водночас без належного контролю та регулювання біопаливне виробництво може створювати додаткові екологічні ризики, що зумовлює необхідність удосконалення управлінських і технологічних рішень у цій сфері [128].

#### 3.4 SWOT-аналіз перспектив розвитку біопаливної галузі України

SWOT-аналіз є ефективним інструментом стратегічного аналізу, який дозволяє комплексно оцінити внутрішні та зовнішні чинники, що впливають на розвиток біопаливної галузі. Застосування цього методу дає змогу систематизувати наявні переваги та обмеження біопаливного виробництва в Україні, а також визначити перспективні напрями його подальшого розвитку з урахуванням екологічних, економічних і соціальних аспектів [129].

До основних сильних сторін біопаливної галузі України належить значний природно-ресурсний потенціал, зокрема наявність великих обсягів аграрних і лісових відходів, які можуть бути використані як сировина для

виробництва біопалива. Україна є однією з провідних аграрних країн Європи, що створює сприятливі умови для розвитку біоенергетики без суттєвого імпорту сировини [130].

Важливою перевагою є також екологічний ефект від розвитку біопаливної галузі, який полягає у скороченні викидів парникових газів, зменшенні обсягів органічних відходів і диверсифікації енергетичного балансу. Біопаливо розглядається як один із ключових інструментів підвищення енергетичної незалежності та децентралізації енергопостачання, що є особливо актуальним для регіонів і територіальних громад [131].

Серед слабких сторін розвитку біопаливної галузі в Україні слід відзначити нерівномірність розвитку окремих сегментів біоенергетики. Переважання твердого біопалива та відносно повільний розвиток рідких видів біопалива і біометану свідчать про обмежену диверсифікацію галузі [132].

До внутрішніх проблем належать також недостатній рівень технологічного оснащення частини підприємств, обмежений доступ до інвестиційних ресурсів і недосконалість системи екологічного моніторингу. У деяких випадках відсутність комплексного екологічного контролю знижує довіру до біопаливних проєктів з боку інвесторів і громадськості [133].

Перспективи розвитку біопаливної галузі України значною мірою пов'язані з євроінтеграційними процесами та адаптацією національного законодавства до вимог Європейського Союзу. Зростання попиту на відновлювані джерела енергії, впровадження критеріїв сталості та розвиток ринку біометану відкривають нові можливості для українських виробників [134].

Важливим чинником є також післявоєнне відновлення країни, у межах якого біоенергетика може стати складовою “зеленої” трансформації економіки. Розвиток біопаливних проєктів на місцевому рівні сприятиме створенню робочих місць, розвитку сільських територій та зменшенню екологічного навантаження [135].

Серед зовнішніх загроз для біопаливної галузі України слід виокремити макроекономічну нестабільність, війнні ризики та порушення логістичних ланцюгів, що ускладнюють реалізацію інвестиційних проєктів. Крім того, конкуренція за біомасу з боку інших секторів економіки може призводити до зростання вартості сировини [136].

Екологічні загрози пов'язані з ризиком нераціонального використання земельних ресурсів, деградацією ґрунтів та можливими негативними наслідками інтенсифікації виробництва біопалива без належного екологічного контролю. Це підкреслює важливість удосконалення системи екологічного моніторингу та державного регулювання [137].

Таким чином, SWOT-аналіз свідчить, що біопаливна галузь України має значний потенціал розвитку, однак його реалізація можлива лише за умови усунення внутрішніх обмежень і мінімізації зовнішніх загроз. Ключовою передумовою сталого розвитку галузі є впровадження ефективної системи екологічного моніторингу, удосконалення нормативно-правового регулювання та підтримка інноваційних біоенергетичних технологій [138].

## 4 ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА

### 4.1 Розрахунок скорочення викидів парникових газів при використанні біопалива

Одним із ключових критеріїв екологічної ефективності біопаливного виробництва є рівень скорочення викидів парникових газів у порівнянні з використанням традиційних викопних видів палива. Оцінка цього показника дозволяє кількісно обґрунтувати кліматичні переваги біопалива та є обов'язковим елементом екологічного моніторингу і стратегічного планування розвитку біоенергетики [139].

Розрахунок скорочення викидів парникових газів ґрунтується на порівнянні питомих викидів CO<sub>2</sub>-еквіваленту при використанні біопалива та відповідного викопного палива-аналога. У загальному вигляді скорочення викидів визначається за формулою:

$$\Delta E = E_{\text{вик}} - E_{\text{біо}},$$

де:

$\Delta E$  - скорочення викидів парникових газів, т CO<sub>2</sub>-екв.;

$E_{\text{вик}}$  - питомі викиди при використанні викопного палива, т CO<sub>2</sub>-екв.;

$E_{\text{біо}}$  - питомі викиди при використанні біопалива з урахуванням життєвого циклу, т CO<sub>2</sub>-екв.

Для оцінки відносного скорочення викидів використовується показник ефективності:

$$\eta = \frac{E_{\text{вик}} - E_{\text{біо}}}{E_{\text{вик}}} \cdot 100\%,$$

де:

$\eta$  - відсоток скорочення викидів парникових газів.

### Вихідні дані для розрахунку

Для умов України доцільно використовувати усереднені значення питомих викидів, рекомендовані міжнародними організаціями (IPCC, ЄС) та адаптовані до національних умов. У якості прикладу розглянемо заміщення викопного палива біопаливом у виробництві теплової енергії.

Вугілля (викопне паливо):

$$E_{\text{ВИК}} = 94 \text{ кг CO}_2\text{-екв./ГДж}$$

Тверде біопаливо (пелети):

$$E_{\text{біо}} = 20 \text{ кг CO}_2\text{-екв./ГДж}$$

(з урахуванням вирощування, транспортування та переробки біомаси)

$Q = 10000 \text{ ГДж}$  теплової енергії на рік.

Викиди при використанні вугілля:

$$E_{\text{ВИК}}^{\text{заг}} = 94 \cdot 10\,000 = 940\,000 \text{ кг CO}_2\text{-екв.} = 940 \text{ т CO}_2\text{-екв.}$$

Викиди при використанні біопалива:

$$E_{\text{біо}}^{\text{заг}} = 20 \cdot 10\,000 = 200\,000 \text{ кг CO}_2\text{-екв.} = 200 \text{ т CO}_2\text{-екв.}$$

Скорочення викидів:

$$\Delta E = 940 - 200 = 740 \text{ т CO}_2\text{-екв.}$$

Відносне скорочення:

$$\eta = \frac{740}{940} \cdot 100\% \approx 78,7\%$$

Отримані результати свідчать, що використання твердого біопалива замість вугілля дозволяє скоротити викиди парникових газів майже на 80%, що підтверджує його високу екологічну ефективність.

Для узагальнення результатів розрахунків доцільно здійснити порівняльну оцінку скорочення викидів парникових газів для основних видів біопалива, що використовуються в Україні.

Таблиця 4.1 – Скорочення викидів парникових газів при використанні біопалива

<b>Вид біопалива</b>	<b>Паливо-замінник</b>	<b>Скорочення викидів, %</b>
Тверде біопаливо	Вугілля	70–85
Біогаз	Природний газ	60–90
Біоетанол	Бензин	35–65
Біодизель	Дизельне паливо	40–70

Розрахунок скорочення викидів парникових газів при використанні біопалива свідчить про значний потенціал біоенергетики у зменшенні кліматичного навантаження енергетичного сектору України. Найвищий екологічний ефект досягається при використанні біогазу та твердого біопалива за умови сталого управління сировинною базою та ефективного екологічного моніторингу. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування доцільності розширення біопаливного виробництва та формування національної кліматичної політики [140].

#### 4.2 Порівняльна екологічна ефективність біопалива та традиційних видів палива

Порівняльна оцінка екологічної ефективності біопалива та традиційних видів палива є важливим інструментом обґрунтування доцільності енергетичного переходу в Україні. Така оцінка дозволяє визначити не лише рівень скорочення викидів парникових газів, але й комплексний вплив різних видів палива на основні компоненти довкілля з урахуванням усього життєвого циклу — від видобутку або вирощування сировини до кінцевого споживання енергії [143].

Для порівняння екологічної ефективності біопалива та традиційних видів палива доцільно використовувати сукупність критеріїв, які відображають різні аспекти екологічного впливу. До основних критеріїв

належать: рівень викидів парникових газів, вплив на якість атмосферного повітря, споживання природних ресурсів, утворення відходів та довгостроковий вплив на екосистеми [144].

Застосування багатокритеріального підходу дозволяє уникнути однобічної оцінки, коли екологічні переваги біопалива розглядаються виключно через призму викидів CO<sub>2</sub>, без урахування інших факторів екологічного навантаження.

Як показано в підрозділі 4.1, біопаливо має суттєві переваги над традиційними видами палива з точки зору скорочення викидів парникових газів. Для більшості видів біопалива характерне зменшення викидів CO<sub>2</sub>-еквіваленту на 40–80% порівняно з викопними аналогами, що зумовлено відновлюваним характером біомаси та заміщенням викопного вуглецю біогенним [145].

Традиційні види палива, зокрема вугілля, природний газ і нафтопродукти, характеризуються стабільно високими питомими викидами парникових газів, які не можуть бути знижені без застосування дорогих технологій уловлювання та зберігання вуглецю.

З точки зору локального впливу на якість атмосферного повітря екологічна ефективність біопалива є неоднозначною. Спалювання біопалива, особливо твердого, може супроводжуватися підвищеними викидами твердих частинок та оксидів азоту у разі використання застарілого обладнання. Водночас сучасні біоенергетичні установки з ефективними системами очищення газів дозволяють досягати показників, співставних або кращих за традиційні котельні на вугіллі .

Природний газ має нижчі викиди твердих частинок у порівнянні з біомасою, однак його використання супроводжується значними викидами метану на етапах видобутку та транспортування, що негативно впливає на кліматичний баланс.

Традиційні види палива характеризуються невідновлюваністю ресурсної бази та значним екологічним навантаженням на етапі видобутку.

Вугледобувна та нафтогазова промисловість супроводжуються деградацією земель, забрудненням водних ресурсів і накопиченням відходів.

Біопаливо, навпаки, базується на відновлюваних ресурсах і дозволяє ефективно утилізувати аграрні та органічні відходи. Побічні продукти біопаливного виробництва за умови належного управління можуть бути повторно використані, що відповідає принципам циркулярної економіки [146].

Для узагальнення результатів порівняльної екологічної оцінки доцільно представити основні характеристики біопалива та традиційних видів палива у вигляді таблиці.

Таблиця 4.2 – Порівняльна екологічна ефективність біопалива та традиційних видів палива

<b>Критерій оцінки</b>	<b>Біопаливо</b>	<b>Традиційні види палива</b>
Викиди парникових газів	Низькі–середні	Високі
Відновлюваність ресурсів	Відновлювані	Невідновлювані
Вплив на якість повітря	Залежить від технології	Стабільно негативний
Утворення відходів	Можливість утилізації	Значні обсяги
Довгостроковий екологічний вплив	Помірний	Високий

Порівняльна екологічна оцінка свідчить, що біопаливо має суттєві переваги над традиційними видами палива з точки зору кліматичної ефективності та сталого використання ресурсів. Водночас екологічні переваги біопалива реалізуються повною мірою лише за умови впровадження сучасних технологій виробництва, ефективних систем очищення викидів і комплексного екологічного моніторингу. Це підтверджує необхідність інтеграції екологічних критеріїв у процеси планування та розвитку біопаливної галузі в Україні.

### 4.3 Оцінка ресурсного потенціалу біомаси для виробництва біопалива в Україні

Ресурсний потенціал біомаси є визначальним фактором розвитку біопаливної галузі, оскільки саме наявність достатньої кількості сировини забезпечує стабільність виробництва, економічну доцільність та екологічну ефективність біоенергетичних технологій. В умовах України оцінка цього потенціалу набуває особливого значення з огляду на аграрну спеціалізацію країни, значні площі сільськогосподарських угідь, розвинене тваринництво та наявність лісових ресурсів.

Формування ресурсної бази біопаливного виробництва в Україні відбувається за рахунок різних видів біомаси, які мають неоднакові обсяги, доступність та екологічні характеристики. Основну частку потенціалу становлять аграрні відходи рослинництва, що утворюються в процесі вирощування та переробки зернових і технічних культур. Їх використання для енергетичних цілей є екологічно доцільним за умови дотримання агроекологічних обмежень, спрямованих на збереження родючості ґрунтів і підтримання гумусового балансу.

Залучення аграрної біомаси до виробництва біопалива дозволяє не лише замінювати традиційні енергоресурси, але й вирішувати проблему утилізації сільськогосподарських відходів, які за відсутності використання часто спалюються на полях, спричиняючи додаткове забруднення атмосферного повітря. Таким чином, використання цієї сировини має комплексний екологічний ефект, поєднуючи енергетичні та природоохоронні завдання.

Важливим складником ресурсного потенціалу біомаси є відходи тваринництва, зокрема гній і гноївка, які можуть бути ефективно використані для виробництва біогазу. Україна має значні можливості у цьому сегменті, особливо в регіонах з високою концентрацією тваринницьких підприємств. Біогазове використання відходів тваринництва сприяє зменшенню викидів

метану, який є одним із найпотужніших парникових газів, а також знижує ризики забруднення ґрунтів і водних ресурсів .

Додатковою екологічною перевагою біогазового виробництва є утворення дигестату — побічного продукту, який за належного контролю може використовуватися як органічне добриво. Це сприяє замиканню біогенних циклів у сільському господарстві та зменшенню потреби у мінеральних добривах, що позитивно впливає на стан ґрунтів.

Окреме місце у структурі ресурсного потенціалу займає деревна біомаса, яка включає лісосічні відходи, відходи деревообробної промисловості та низькосортну деревину. Цей вид біомаси є важливим джерелом для виробництва твердого біопалива та теплової енергії, особливо на локальному рівні — у громадах, закладах соціальної сфери та малих котельнях. Водночас використання деревної біомаси потребує суворого дотримання принципів сталого лісокористування, оскільки надмірна або неконтрольована заготівля може призводити до деградації лісових екосистем. Перспективним напрямом розвитку біопаливної галузі є залучення до енергетичного використання спеціально вирощуваних енергетичних культур, таких як міскантус, енергетична верба та тополя. Їх вирощування можливе на малопродуктивних і деградованих землях, що зменшує конкуренцію з продовольчим виробництвом та дозволяє раціонально використовувати земельні ресурси . Енергетичні культури забезпечують більш прогнозовану та стабільну сировинну базу, що є важливим для довгострокового планування розвитку біоенергетичних потужностей.

Узагальнюючи результати оцінки ресурсного потенціалу біомаси, можна стверджувати, що Україна має достатні передумови для суттєвого розширення виробництва біопалива без критичного впливу на продовольчу безпеку та екологічну рівновагу. Найбільший потенціал зосереджений у сегментах аграрної біомаси та біогазу, тоді як розвиток енергетичних культур може стати стратегічною основою стабільного розвитку біопаливної галузі в довгостроковій перспективі. Реалізація цього потенціалу потребує

комплексного підходу, що включає екологічний моніторинг, раціональне землекористування та державну підтримку інноваційних біоенергетичних проєктів.

#### 4.4 Аналіз екологічних та енергетичних переваг заміщення викопного палива біопаливом

Заміщення викопного палива біопаливом розглядається як один із ключових напрямів трансформації енергетичного сектору в умовах переходу до сталого розвитку. Для України ця трансформація має не лише екологічне, але й стратегічне енергетичне значення, зумовлене високою залежністю від імпорту викопних енергоресурсів та необхідністю зменшення антропогенного навантаження на довкілля.

З екологічної точки зору основною перевагою біопалива є суттєве скорочення викидів парникових газів у порівнянні з традиційними видами палива. Як показано в підрозділі 4.1, використання біопалива дозволяє знизити викиди CO<sub>2</sub>-еквіваленту на десятки відсотків залежно від виду біопалива та заміщуваного викопного ресурсу. Це пов'язано з тим, що біомаса є відновлюваним джерелом вуглецю, а вуглець, що вивільняється під час її спалювання, попередньо був поглинутий рослинами з атмосфери в процесі фотосинтезу.

Важливою екологічною перевагою заміщення викопного палива біопаливом є зменшення негативного впливу на атмосферне повітря у довгостроковій перспективі. Хоча спалювання біопалива також супроводжується викидами забруднювальних речовин, відсутність сірки у біомасі та нижчий вміст токсичних домішок зумовлюють зменшення викидів діоксиду сірки та важких металів у порівнянні з вугіллям і мазутом. За умови використання сучасного обладнання та систем очищення димових газів локальний вплив біоенергетичних установок на якість повітря може бути істотно знижений.

Заміщення викопного палива біопаливом також має позитивний вплив на поводження з відходами та стан екосистем. Використання аграрних, лісових і органічних відходів для енергетичних цілей дозволяє скоротити обсяги їх накопичення, зменшити ризики забруднення ґрунтів і водних ресурсів, а також запобігти неконтрольованому спалюванню відходів. Таким чином, біоенергетика поєднує функції виробництва енергії та екологічно безпечної утилізації біомаси.

З енергетичної точки зору заміщення викопного палива біопаливом сприяє підвищенню енергетичної незалежності та безпеки країни. Біопаливо виробляється з локальних ресурсів, що зменшує залежність від імпорту енергоносіїв і підвищує стійкість енергетичної системи до зовнішніх ризиків. Особливо важливим це є для децентралізованих систем енергопостачання, громад та об'єктів соціальної інфраструктури, де біопаливо може виступати надійним альтернативним джерелом енергії.

Крім того, біопаливо сприяє диверсифікації енергетичного балансу та підвищенню гнучкості енергетичної системи. На відміну від сонячної та вітрової енергетики, біоенергетика забезпечує стабільне та прогнозоване виробництво енергії, що є важливим для балансування енергосистеми та покриття базового навантаження.

Разом з тим реалізація екологічних та енергетичних переваг заміщення викопного палива біопаливом можлива лише за умови дотримання принципів сталого розвитку. Необґрунтоване розширення біопаливного виробництва без урахування екологічних обмежень може призводити до деградації ґрунтів, надмірного використання земельних ресурсів і втрати біорізноманіття. У зв'язку з цим ключову роль відіграє екологічний моніторинг, який забезпечує контроль за впливом біопаливних технологій на довкілля та дозволяє своєчасно коригувати напрями розвитку галузі.

Отже, заміщення викопного палива біопаливом має суттєві екологічні та енергетичні переваги для України, зокрема скорочення викидів парникових газів, підвищення енергетичної безпеки, зменшення обсягів

відходів і диверсифікацію енергетичного балансу. Водночас ефективна реалізація цих переваг потребує комплексного підходу, що поєднує розвиток біоенергетики з екологічним моніторингом, раціональним використанням ресурсів і державною підтримкою інноваційних технологій.

## 5 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

### 5.1 Перспективні напрями розвитку біопаливної галузі в Україні

Розвиток біопаливної галузі в Україні в середньо- та довгостроковій перспективі визначається поєднанням внутрішніх ресурсних можливостей, зовнішніх викликів та стратегічних пріоритетів державної енергетичної й екологічної політики. В умовах трансформації енергетичного сектору, післявоєнного відновлення та євроінтеграційних процесів біоенергетика розглядається як один із ключових інструментів забезпечення сталого розвитку та підвищення енергетичної безпеки країни.

Одним із найперспективніших напрямів розвитку біопаливної галузі в Україні є розширення використання аграрної біомаси та органічних відходів для виробництва енергії. Значні обсяги побічної продукції рослинництва та відходів тваринництва створюють передумови для масштабування виробництва твердого біопалива та біогазу без істотного впливу на продовольчу безпеку. Особливу роль у цьому контексті відіграє розвиток біоенергетики на місцевому рівні, що дозволяє залучати локальні ресурси та зменшувати транспортні витрат.

Важливим перспективним напрямом є розвиток біогазових і біометанових технологій. Біогазові комплекси на базі агропромислових підприємств та об'єктів комунального господарства дозволяють поєднувати виробництво енергії з вирішенням екологічних проблем утилізації органічних відходів. Подальша інтеграція біометану в газотранспортну систему України відкриває можливості для його використання як заміника природного газу, а також для експорту до країн Європейського Союзу.

Перспективним напрямом розвитку біопаливної галузі є також вирощування енергетичних культур на деградованих, малопродуктивних і

виведених з обробітку землях. Такий підхід дозволяє розширювати сировинну базу біоенергетики без конкуренції з продовольчим виробництвом і водночас сприяти відновленню земельних ресурсів. Енергетичні культури забезпечують більш стабільне та прогнозоване постачання біомаси, що є важливим для довгострокового планування інвестицій у біоенергетичну інфраструктуру.

Окремим перспективним напрямом є модернізація та технологічне оновлення існуючих біопаливних підприємств. Впровадження сучасних технологій переробки біомаси, підвищення енергоефективності установок і застосування систем очищення викидів дозволяють істотно знизити екологічне навантаження та підвищити конкурентоспроможність біопаливної продукції. У цьому контексті важливу роль відіграє інтеграція принципів найкращих доступних технологій у виробничі процеси.

Значний потенціал має також розвиток децентралізованих біоенергетичних систем, орієнтованих на забезпечення енергетичних потреб громад, об'єктів соціальної інфраструктури та аграрного сектору. Такі системи підвищують стійкість енергопостачання, зменшують втрати під час транспортування енергії та сприяють соціально-економічному розвитку регіонів.

Реалізація перспектив розвитку біопаливної галузі в Україні потребує комплексного підходу, що поєднує розвиток виробничих потужностей із удосконаленням системи екологічного моніторингу. Саме ефективний моніторинг дозволяє забезпечити контроль за впливом біопаливних технологій на довкілля, своєчасно виявляти екологічні ризики та формувати науково обґрунтовані управлінські рішення. У цьому контексті перспективи біоенергетики тісно пов'язані з впровадженням сучасних інформаційних систем, автоматизованого збору даних і інтеграції екологічних показників у процеси стратегічного планування.

Отже, перспективні напрями розвитку біопаливної галузі в Україні охоплюють розширення використання біомаси, розвиток біогазових і

біометанових технологій, вирощування енергетичних культур, модернізацію виробництва та децентралізацію енергопостачання. Реалізація цих напрямів створює передумови для формування стійкої, екологічно орієнтованої та енергетично незалежної економіки.

## 5.2 Пропозиції щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу виробництва біопалива

Сучасний стан розвитку біопаливної галузі в Україні потребує переходу до більш досконалої та комплексної системи екологічного моніторингу, здатної забезпечити ефективний контроль за впливом виробництва біопалива на довкілля та підтримати реалізацію принципів сталого розвитку. Вдосконалення цієї системи має ґрунтуватися не лише на розширенні обсягів спостережень, а й на підвищенні їх якості, інтегрованості та управлінської значущості.

Однією з ключових пропозицій є запровадження комплексного підходу до екологічного моніторингу біопаливного виробництва, який охоплював би всі основні компоненти довкілля та етапи життєвого циклу біопалива. Такий підхід передбачає поєднання контролю за викидами в атмосферне повітря, скидами у водні об'єкти, станом ґрунтів, утворенням відходів і викидами парникових газів у єдину систему оцінювання. Це дозволить перейти від фрагментарного контролю окремих показників до цілісної оцінки екологічної ефективності біопаливних підприємств.

Важливою пропозицією є удосконалення методичного забезпечення екологічного моніторингу з урахуванням специфіки біопаливної галузі. Доцільним є розроблення галузевих рекомендацій і стандартів, які б визначали перелік обов'язкових показників, періодичність їх вимірювання та порядок обробки результатів. Особливу увагу слід приділяти моніторингу

викидів парникових газів і оцінці скорочення вуглецевого сліду, що відповідає сучасним кліматичним пріоритетам України.

Перспективною пропозицією є активне впровадження цифрових технологій у систему екологічного моніторингу біопаливного виробництва. Використання автоматизованих засобів вимірювання, сенсорних систем, геоінформаційних технологій та єдиних електронних платформ для збору і зберігання екологічних даних дозволить підвищити оперативність моніторингу та зменшити суб'єктивність оцінок. Крім того, цифровізація сприятиме підвищенню прозорості екологічної інформації та довіри з боку громадськості й інвесторів.

Окремої уваги потребує інтеграція результатів екологічного моніторингу у процеси управління розвитком біопаливної галузі. Запропоновано використовувати дані моніторингу не лише для звітності, а й як інструмент прийняття управлінських рішень — зокрема під час планування розміщення нових біопаливних підприємств, вибору технологій та оцінювання ефективності екологічних заходів. Такий підхід сприятиме підвищенню превентивного характеру екологічного контролю.

Важливою пропозицією є посилення ролі екологічного моніторингу на місцевому рівні, особливо у громадах, де розміщені біопаливні об'єкти. Залучення органів місцевого самоврядування до процесу моніторингу, а також інформування населення про результати екологічних спостережень сприятиме підвищенню соціальної прийнятності біоенергетичних проєктів та зменшенню конфліктних ситуацій.

У контексті євроінтеграції доцільним є поступове узгодження національної системи екологічного моніторингу біопаливного виробництва з підходами та вимогами Європейського Союзу. Це передбачає адаптацію методик оцінювання, звітності щодо викидів парникових газів і впровадження принципів життєвого циклу продукції. Така гармонізація створить передумови для підвищення конкурентоспроможності українського біопалива на міжнародних ринках.

Отже, реалізація запропонованих заходів щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу виробництва біопалива дозволить забезпечити більш ефективний контроль за впливом біоенергетичних технологій на довкілля, підвищити обґрунтованість управлінських рішень та сприяти сталому розвитку біопаливної галузі в Україні.

### 5.3 Екологічні, економічні та соціальні ефекти розвитку біоенергетики

Розвиток біоенергетики в Україні має комплексний характер і супроводжується формуванням екологічних, економічних та соціальних ефектів, які взаємно підсилюють один одного. На відміну від традиційних енергетичних галузей, біоенергетика поєднує вирішення енергетичних завдань із завданнями охорони довкілля та соціально-економічного розвитку територій, що зумовлює її важливу роль у реалізації концепції сталого розвитку.

Екологічні ефекти розвитку біоенергетики насамперед проявляються у зменшенні негативного впливу енергетичного сектору на довкілля. Використання біопалива сприяє скороченню викидів парникових газів у порівнянні з викопними видами палива, що підтверджує його значний потенціал у досягненні кліматичних цілей. Крім того, біоенергетичні технології дозволяють зменшити обсяги накопичення аграрних, лісових та органічних відходів, які за відсутності утилізації часто стають джерелами забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів.

Важливим екологічним ефектом є також зниження навантаження на природні екосистеми, пов'язаного з видобутком викопних енергоресурсів. На відміну від вуглевидобувної та нафтогазової промисловості, біоенергетика за умови дотримання принципів сталого використання ресурсів має менший ризик деградації ландшафтів і порушення природних екосистем. Водночас екологічний ефект біоенергетики значною мірою залежить від ефективності

екологічного моніторингу, який забезпечує контроль за раціональним використанням біомаси та запобігає негативним наслідкам надмірної інтенсифікації виробництва.

Економічні ефекти розвитку біоенергетики проявляються у підвищенні енергетичної незалежності та диверсифікації енергетичного балансу країни. Використання місцевих видів біомаси дозволяє зменшити залежність від імпорту викопних енергоресурсів і знизити вплив зовнішніх цінових коливань на національну економіку. Крім того, розвиток біоенергетики стимулює інвестиційну активність, створює умови для модернізації енергетичної інфраструктури та впровадження інноваційних технологій.

Економічна доцільність біоенергетичних проєктів також пов'язана з мультиплікативним ефектом для суміжних галузей, зокрема сільського господарства, машинобудування, транспорту та сфери послуг. Залучення аграрної біомаси до енергетичного використання створює додаткові джерела доходів для сільськогосподарських виробників і сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів.

Соціальні ефекти розвитку біоенергетики є не менш важливими та проявляються насамперед на регіональному та місцевому рівнях. Створення біоенергетичних підприємств і децентралізованих систем енергопостачання сприяє створенню нових робочих місць, особливо у сільській місцевості, де проблема зайнятості є особливо актуальною. Це позитивно впливає на соціально-економічний розвиток територій і зменшує міграційні процеси.

Крім того, розвиток біоенергетики сприяє підвищенню енергетичної доступності та надійності енергопостачання для громад, об'єктів соціальної інфраструктури та аграрного сектору. Використання локальних джерел енергії підвищує стійкість енергетичних систем до кризових ситуацій та надзвичайних подій, що має важливе соціальне значення.

Таким чином, екологічні, економічні та соціальні ефекти розвитку біоенергетики формують комплексний позитивний вплив на сталий розвиток України. Реалізація цих ефектів потребує узгодженого розвитку виробничих

потужностей, ефективного екологічного моніторингу та державної підтримки, спрямованої на балансування енергетичних потреб і вимог охорони довкілля.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 6.1 Загальні положення з охорони праці на підприємствах з виробництва біопалива

Охорона праці на підприємствах з виробництва біопалива є важливою складовою загальної системи управління безпекою виробництва та спрямована на збереження життя, здоров'я і працездатності працівників у процесі трудової діяльності. Особливості біопаливного виробництва, пов'язані з використанням органічної сировини, механізованого обладнання, біологічних процесів та підвищеної пожежної небезпеки, зумовлюють необхідність комплексного підходу до організації охорони праці.

Система охорони праці на біопаливних підприємствах повинна функціонувати відповідно до вимог чинного законодавства України у сфері безпеки праці та включати організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні та профілактичні заходи. Основною метою охорони праці є створення безпечних і нешкідливих умов праці, запобігання виробничому травматизму, професійним захворюванням та аварійним ситуаціям.

Виробничі процеси у біопаливній галузі можуть супроводжуватися дією небезпечних і шкідливих виробничих факторів, зокрема механічних, хімічних, біологічних, фізичних і пожежонебезпечних. До таких факторів належать рухомі частини машин і механізмів, пил біомаси, біогаз, підвищені температури, шум, вібрація, а також ризик утворення вибухонебезпечних газоповітряних сумішей. У зв'язку з цим охорона праці повинна бути інтегрована у всі етапи виробничого процесу — від приймання сировини до зберігання та транспортування готової продукції.

Організація охорони праці на підприємствах з виробництва біопалива передбачає чіткий розподіл обов'язків між роботодавцем та працівниками. Роботодавець зобов'язаний забезпечити безпечний технічний стан обладнання, впроваджувати сучасні технології, проводити навчання та інструктажі з охорони праці, а також здійснювати контроль за дотриманням вимог безпеки. Працівники, у свою чергу, зобов'язані дотримуватися встановлених правил, використовувати засоби індивідуального захисту та негайно повідомляти про виявлені небезпечні ситуації.

Важливим елементом системи охорони праці є проведення попередніх і періодичних медичних оглядів працівників, що дозволяє своєчасно виявляти ознаки професійних захворювань та запобігати негативному впливу шкідливих виробничих факторів на здоров'я персоналу. Крім того, на біопаливних підприємствах необхідно забезпечувати відповідні санітарно-гігієнічні умови праці, зокрема вентиляцію виробничих приміщень, контроль мікроклімату та рівнів шуму.

Загальні положення з охорони праці на підприємствах з виробництва біопалива мають враховувати також питання підготовки персоналу до дій у разі виникнення аварійних та надзвичайних ситуацій. Формування культури безпеки праці, регулярне проведення навчань і тренувань, а також розроблення планів реагування на надзвичайні ситуації є необхідними умовами зниження ризиків та мінімізації можливих наслідків аварій.

Таким чином, охорона праці на підприємствах з виробництва біопалива є системним процесом, що поєднує правові, організаційні та технічні заходи і спрямований на забезпечення безпечних умов праці, підвищення надійності виробничих процесів та запобігання негативним наслідкам для працівників і довкілля.

## 6.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Виробнича діяльність підприємств з виробництва біопалива характеризується наявністю комплексу небезпечних і шкідливих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я та безпеку працівників. Аналіз таких факторів є необхідною умовою формування ефективної системи охорони праці, оскільки дозволяє ідентифікувати потенційні ризики, оцінити їх рівень і визначити пріоритетні напрями профілактичних заходів.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори на біопаливних підприємствах формуються внаслідок специфіки технологічних процесів, пов'язаних із прийманням, зберіганням і переробкою біомаси, експлуатацією механізованого обладнання, біохімічними процесами, а також з використанням енергетичних установок. Залежно від характеру впливу ці фактори доцільно розглядати за основними групами.

До фізичних виробничих факторів належать підвищений рівень шуму та вібрації, несприятливі параметри мікроклімату, запиленість повітря виробничих приміщень, а також вплив підвищених або знижених температур. Найбільш інтенсивний шум і вібрація виникають під час роботи подрібнювачів, пресів, транспортерів і компресорів. Запиленість повітря характерна для ділянок зберігання та підготовки біомаси, що може спричиняти захворювання органів дихання та алергічні реакції за відсутності належної вентиляції.

Хімічні фактори пов'язані з можливим виділенням шкідливих газів і парів у процесі виробництва біопалива. Особливу небезпеку становлять біогаз та його компоненти, зокрема метан і сірководень, які можуть утворювати вибухонебезпечні або токсичні концентрації. Крім того, у виробничих процесах можуть застосовуватися допоміжні хімічні речовини, контакт з якими за порушення правил безпеки може негативно впливати на здоров'я працівників.

Біологічні фактори є характерними передусім для підприємств, що використовують органічну сировину та біотехнологічні процеси. Мікроорганізми, грибки та продукти їх життєдіяльності можуть бути присутніми у повітрі виробничих приміщень, особливо за підвищеної вологості та недостатньої санітарної обробки. Тривалий вплив таких факторів здатний викликати інфекційні та алергічні захворювання.

Значну групу становлять механічні небезпечні фактори, пов'язані з експлуатацією рухомих частин машин і механізмів, транспортерів, дробарок і пресового обладнання. Порушення вимог безпеки під час обслуговування обладнання, відсутність захисних огорожень або недостатня кваліфікація персоналу можуть призводити до травмування працівників.

Окрему увагу слід приділити пожежо- та вибухонебезпечним факторам, які є одними з найбільш критичних у біопаливному виробництві. Накопичення пилу біомаси, наявність горючих газів, високі температури та джерела запалювання створюють передумови для виникнення пожеж і вибухів. Особливо небезпечними є ділянки зберігання біопалива та біогазові установки, де необхідне суворе дотримання протипожежних вимог.

Психофізіологічні фактори також впливають на безпеку праці та пов'язані з напруженістю трудового процесу, монотонністю операцій, підвищеною відповідальністю за роботу обладнання та можливими змінами режимів роботи. Надмірне навантаження та втома можуть знижувати увагу працівників і збільшувати ймовірність аварійних ситуацій.

Таким чином, аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів свідчить, що біопаливне виробництво потребує комплексного підходу до організації охорони праці. Виявлення та систематизація факторів ризику створюють основу для розроблення ефективних заходів щодо забезпечення безпечних умов праці, які будуть розглянуті у наступних підрозділах.

### 6.3 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці

Забезпечення безпечних умов праці на підприємствах з виробництва біопалива ґрунтується на системному підході, який передбачає поєднання організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та профілактичних заходів. Реалізація таких заходів має бути спрямована на усунення або мінімізацію впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, виявлених у процесі аналізу умов праці, а також на формування культури безпеки серед персоналу.

Організаційні заходи відіграють ключову роль у створенні безпечного виробничого середовища. Вони включають розроблення та впровадження інструкцій з охорони праці для всіх видів робіт, проведення первинного, повторного та позапланового інструктажу, а також систематичне навчання працівників безпечним методам виконання виробничих операцій. Особлива увага має приділятися підготовці персоналу, який обслуговує біогазові установки, теплогенератори та інше обладнання підвищеної небезпеки. Важливим елементом організаційних заходів є також контроль за дотриманням вимог охорони праці та відповідальність посадових осіб за порушення правил безпеки.

Технічні заходи спрямовані на зниження рівня небезпеки безпосередньо у виробничому процесі. До них належать забезпечення справного технічного стану обладнання, застосування захисних огорожень рухомих частин машин і механізмів, автоматизація та дистанційне керування технологічними процесами. Для зменшення ризику пожеж і вибухів необхідно використовувати вибухозахищене електрообладнання, системи контролю загазованості та аварійного відключення обладнання. Регулярне технічне обслуговування і своєчасний ремонт обладнання є обов'язковими умовами безпечної експлуатації біопаливних установок.

Санітарно-гігієнічні заходи спрямовані на забезпечення сприятливих умов праці та зменшення негативного впливу шкідливих факторів на

здоров'я працівників. На біопаливних підприємствах необхідно забезпечувати ефективну вентиляцію виробничих приміщень для зниження запиленості та концентрації шкідливих газів, підтримувати оптимальні параметри мікроклімату, контролювати рівні шуму і вібрації. Працівники повинні бути забезпечені відповідними засобами індивідуального захисту, зокрема спецодягом, засобами захисту органів дихання, слуху та зору, відповідно до характеру виконуваних робіт.

Важливе значення мають профілактичні заходи, спрямовані на збереження здоров'я працівників і запобігання професійним захворюванням. До таких заходів належать проведення попередніх і періодичних медичних оглядів, організація раціональних режимів праці та відпочинку, а також заходи з психофізіологічної підтримки персоналу. Запобігання перевтомі та стресу працівників сприяє зниженню ймовірності помилок і аварійних ситуацій у виробничому процесі.

Окрему увагу слід приділяти заходам щодо підвищення рівня готовності персоналу до дій у разі виникнення аварійних і надзвичайних ситуацій. Розроблення планів локалізації та ліквідації аварій, проведення навчань і тренувань з евакуації, а також оснащення підприємств засобами пожежогасіння і першої медичної допомоги є важливими складовими системи безпеки праці.

Таким чином, забезпечення безпечних умов праці на підприємствах з виробництва біопалива потребує комплексної реалізації організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та профілактичних заходів. Системне впровадження цих заходів дозволяє суттєво знизити рівень виробничих ризиків, підвищити безпеку працівників та забезпечити стабільне і безпечне функціонування біопаливних підприємств.

#### 6.4 Пожежна безпека та дії персоналу у надзвичайних ситуаціях

Пожежна безпека на підприємствах з виробництва біопалива є одним із пріоритетних напрямів системи охорони праці, оскільки технологічні процеси цієї галузі пов'язані з використанням горючих матеріалів, органічної сировини, газоподібних продуктів та обладнання, що працює при підвищених температурах. Забезпечення пожежної безпеки передбачає комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на попередження пожеж, обмеження їх поширення та мінімізацію можливих наслідків для персоналу, виробничих об'єктів і довкілля.

Пожежна небезпека на біопаливних підприємствах зумовлена, зокрема, накопиченням пилу біомаси, наявністю горючих газів (біогазу, метану), використанням електрообладнання та можливістю утворення джерел запалювання. У зв'язку з цим виробничі приміщення повинні бути обладнані відповідними системами пожежної сигналізації, автоматичного пожежогасіння та вентиляції, а електрообладнання — відповідати вимогам вибухо- та пожежобезпеки. Особливу увагу слід приділяти дотриманню правил зберігання біопалива та органічної сировини, які мають зберігатися у спеціально відведених місцях із дотриманням протипожежних відстаней.

Організація пожежної безпеки на підприємствах з виробництва біопалива передбачає також розроблення та впровадження внутрішніх нормативних документів, зокрема інструкцій з пожежної безпеки, планів евакуації та планів реагування на надзвичайні ситуації. Працівники повинні бути ознайомлені з вимогами пожежної безпеки та проходити регулярне навчання і тренування з дій у разі виникнення пожежі або аварійної ситуації.

У разі виникнення пожежі персонал зобов'язаний негайно повідомити про це відповідні служби, зокрема пожежно-рятувальні підрозділи, та вжити заходів щодо оповіщення інших працівників. За можливості і без ризику для життя необхідно використати первинні засоби пожежогасіння для локалізації

осередку займання. Одночасно має бути організована евакуація працівників з небезпечної зони відповідно до затверджених планів евакуації.

Дії персоналу у надзвичайних ситуаціях, пов'язаних з аваріями, витоками газу або вибухонебезпечними ситуаціями, повинні бути чітко регламентовані. У таких випадках необхідно зупинити технологічні процеси, відключити енергопостачання, забезпечити вентиляцію приміщень і вивести персонал за межі небезпечної зони. Важливим елементом є наявність систем оповіщення, які дозволяють оперативно інформувати працівників про загрозу та координувати їхні дії.

Підготовка персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях є невід'ємною складовою пожежної безпеки. Регулярне проведення навчань і тренувань, моделювання можливих аварійних ситуацій та відпрацювання алгоритмів дій сприяють підвищенню готовності працівників і зниженню ймовірності паніки у разі реальної загрози. Особливе значення має навчання відповідальних осіб, які координують дії персоналу та взаємодіють з аварійно-рятувальними службами.

Таким чином, забезпечення пожежної безпеки та підготовка персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях на підприємствах з виробництва біопалива є комплексним завданням, що поєднує технічні, організаційні та навчальні заходи. Системне впровадження цих заходів дозволяє мінімізувати ризики виникнення пожеж і аварій, забезпечити захист працівників та знизити негативні наслідки надзвичайних ситуацій для виробництва і довкілля.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі здійснено комплексне дослідження екологічного моніторингу та перспектив розвитку виробництва біопалива в Україні з урахуванням сучасних викликів енергетичної безпеки, екологічної стійкості та соціально-економічного розвитку. Проведений аналіз підтвердив актуальність обраної теми та її практичну значущість у контексті переходу України до моделі сталого розвитку.

У процесі дослідження розкрито теоретичні та методологічні засади екологічного моніторингу біопаливного виробництва. Встановлено, що екологічний моніторинг є ключовим інструментом контролю та управління впливу біоенергетичних технологій на компоненти довкілля, який забезпечує своєчасне виявлення негативних наслідків та формування обґрунтованих управлінських рішень. Обґрунтовано доцільність застосування комплексного підходу до моніторингу з урахуванням життєвого циклу біопалива.

Проаналізовано сучасний стан і динаміку розвитку біопаливної галузі в Україні. Визначено, що найбільш розвиненими є напрями використання твердого біопалива та біогазу, тоді як виробництво рідких видів біопалива та біометану має значний, але поки що недостатньо реалізований потенціал. SWOT-аналіз засвідчив наявність вагомих сильних сторін галузі, зокрема значного ресурсного потенціалу біомаси та можливостей післявоєнного «зеленого» відновлення, поряд із низкою внутрішніх і зовнішніх обмежень.

У роботі проведено оцінку екологічної ефективності виробництва та використання біопалива. Розрахунки скорочення викидів парникових газів показали, що заміщення викопного палива біопаливом дозволяє зменшити викиди CO<sub>2</sub>-еквіваленту на 40–80% залежно від виду біопалива та умов його виробництва. Порівняльний аналіз підтвердив, що біопаливо має суттєві

екологічні переваги над традиційними енергоносіями за умови впровадження сучасних технологій і ефективного екологічного контролю.

Оцінка ресурсного потенціалу біомаси засвідчила, що Україна володіє достатньою сировинною базою для розвитку біопаливної галузі без критичного впливу на продовольчу безпеку. Найбільший потенціал зосереджений у сфері аграрних відходів та біогазового виробництва, тоді як вирощування енергетичних культур розглядається як стратегічний напрям довгострокового розвитку біоенергетики.

У роботі обґрунтовано екологічні, економічні та соціальні ефекти розвитку біоенергетики. Встановлено, що біопаливна галузь сприяє скороченню антропогенного навантаження на довкілля, підвищенню енергетичної незалежності країни, створенню нових робочих місць і розвитку регіонів. Зазначені ефекти мають комплексний характер і реалізуються найбільш повно за умови узгодження енергетичної та екологічної політики.

Розроблено пропозиції щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу виробництва біопалива, які передбачають розширення переліку контрольованих показників, впровадження цифрових технологій, інтеграцію моніторингових даних у процеси управління та гармонізацію національних підходів з європейськими стандартами. Реалізація запропонованих заходів сприятиме підвищенню екологічної ефективності біопаливних проєктів і їх інвестиційної привабливості.

У розділі з охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори, характерні для підприємств з виробництва біопалива, та обґрунтовано комплекс заходів щодо забезпечення безпечних умов праці й пожежної безпеки. Встановлено, що дотримання вимог охорони праці та готовність персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях є невід'ємними умовами сталого функціонування біопаливних підприємств.

Загалом результати виконаної кваліфікаційної роботи підтверджують, що розвиток біопаливної галузі в Україні є доцільним і перспективним з екологічної, економічної та соціальної точок зору. Запропоновані наукові

положення та практичні рекомендації можуть бути використані у діяльності органів державного управління, підприємств біоенергетичного сектору та при подальших наукових дослідженнях у сфері екологічного моніторингу та сталого енергетичного розвитку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
2. World Energy Outlook 2023. Paris: International Energy Agency, 2023.
3. REN21. *Renewables Global Status Report*. Paris, 2022.
4. European Commission. *Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001*. Brussels, 2018.
5. IRENA. *Bioenergy from renewable sources*. Abu Dhabi, 2022.
6. Cherubini F. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 2010.
7. Калетнік Г.М. Біоенергетика України: стан та перспективи розвитку. Вінниця: ВНАУ, 2019.
8. Держенергоефективності України. *Біоенергетика в Україні: аналітичний огляд*. Київ, 2022.
9. Tilman D. et al. Environmental impacts of bioenergy crops. *Science*, 2009.
10. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».
11. Мельник Л.Г. Екологічна економіка та екологічний моніторинг. Суми: Університетська книга, 2018.
12. Geissdoerfer M. et al. Circular economy and bioenergy systems. *Journal of Cleaner Production*, 2017.
13. Національний план дій з відновлюваної енергетики України до 2030 року. Київ, 2021.
14. FAO. *Bioenergy and environmental sustainability*. Rome, 2020.
15. OECD. *Green growth and sustainable energy systems*. Paris, 2021.
16. World Energy Council. *Energy and Environmental Challenges*. London,

2021.

17. Мельник Л.Г. Основи екологічного моніторингу. Суми: Університетська книга, 2019.
18. Cherubini F., Strømman A.H. Life cycle assessment of bioenergy systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2011.
19. European Environment Agency. *Energy, climate change and environment*. Copenhagen, 2022.
20. Tilman D., Socolow R. et al. Beneficial biofuels — the food, energy, and environment trilemma. *Science*, 2009.
21. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».
22. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment.
23. OECD. *Environmental performance of energy systems*. Paris, 2020.
24. IRENA. *Bioenergy sustainability and environmental impacts*. Abu Dhabi, 2021.
25. European Commission. *Bioeconomy Strategy*. Brussels, 2018.
26. FAO. *Bioenergy, land use and sustainability*. Rome, 2020.
27. Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. *Energy from Biomass*. Springer, 2016.
28. IPCC. *Mitigation of Climate Change*. Geneva, 2022.
29. Searchinger T. et al. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases. *Science*, 2008.
30. ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment.
31. Калетнік Г.М. Біоенергетика та екологічна безпека України. Вінниця, 2020.
32. OECD. *Bioenergy and sustainable development*. Paris, 2021.
33. Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. *Energy from Biomass*. Springer, 2016.
34. IEA Bioenergy. *Bioenergy and climate change*. Paris, 2021.
35. Держенергоефективності України. Потенціал біоенергетики в Україні.

Київ, 2022.

36. Demirbas A. *Biofuels: Securing the Planet's Future Energy Needs*. Springer, 2009.
37. Scarlat N., Dallemand J.-F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 2018.
38. Naik S.N. et al. Production of first and second generation biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010.
39. FAO. *Wood energy*. Rome, 2019.
40. Gnansounou E., Dauriat A. Techno-economic analysis of bioethanol production. *Energy*, 2010.
41. Knothe G. Biodiesel and renewable diesel. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010.
42. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010.
43. OECD. *Bioenergy and environmental sustainability*. Paris, 2021.
44. OECD. *Environmental policy and energy regulation*. Paris, 2020.
45. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».
46. Закон України «Про охорону атмосферного повітря»; Водний кодекс України; Земельний кодекс України.
47. Закон України «Про альтернативні види палива».
48. Закон України «Про альтернативні джерела енергії».
49. Енергетична стратегія України до 2035 року. Київ, 2017.
50. European Commission. *Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001*.
51. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля».
52. IEA. *Sustainable bioenergy policy frameworks*. Paris, 2021.
53. European Environment Agency. *Environmental indicators for energy systems*. Copenhagen, 2021.
54. ISO 14031:2013. Environmental management — Environmental performance evaluation.

55. IPCC. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva, 2019.
56. FAO. *Water use in bioenergy production*. Rome, 2020.
57. Lal R. Soil carbon sequestration and bioenergy crops. *Soil Science Society of America Journal*, 2018.
58. Kaltschmitt M. et al. Resource efficiency of bioenergy systems. *Renewable Energy*, 2016.
59. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment.
60. IEA. *Tracking bioenergy sustainability*. Paris, 2022.
61. European Environment Agency. *Methods for environmental impact assessment*. Copenhagen, 2021.
62. Glasson J., Therivel R., Chadwick A. *Introduction to Environmental Impact Assessment*. Routledge, 2019.
63. ISO 4225:2020. Air quality — General aspects.
64. WHO. *Air quality guidelines*. Geneva, 2021.
65. IPCC. *Emission Factor Database*. Geneva, 2019.
66. IEA. *Bioenergy systems and modelling approaches*. Paris, 2022.
67. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley, 2017.
68. Cherubini F. Comparative life cycle assessment of biofuels. *Energy Policy*, 2010.
69. ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment.
70. Finnveden G. et al. Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 2009.
71. OECD. *Assessing environmental performance of energy systems*. Paris, 2020.
72. European Environment Agency. *Bioenergy and environmental impacts*. Copenhagen, 2021.
73. Glasson J., Therivel R. *Strategic Environmental Assessment*. Routledge, 2019.
74. ISO 14064-1:2018. Greenhouse gases — Quantification and reporting.
75. IPCC. *Climate Change Mitigation*. Geneva, 2022.

76. FAO. *Water footprint of bioenergy*. Rome, 2020.
77. UNESCO. *Water and energy nexus*. Paris, 2021.
78. Lal R. Soil degradation and bioenergy production. *Land Degradation & Development*, 2019.
79. European Commission. *Land use and bioenergy sustainability*. Brussels, 2020.
80. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment.
81. Finnveden G. et al. Environmental systems analysis tools. *Journal of Cleaner Production*, 2018.
82. OECD. *Assessing sustainability of bioenergy systems*. Paris, 2021.
83. European Environment Agency. *Environmental data and information systems*. Copenhagen, 2021.
84. UNEP. *Environmental data management and reporting*. Nairobi, 2020.
85. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Державний моніторинг довкілля. Київ, 2022.
86. Longley P. et al. *Geographic Information Systems and Science*. Wiley, 2015.
87. FAO. *GIS applications in bioenergy*. Rome, 2019.
88. Montgomery D.C., Runger G.C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley, 2018.
89. OECD. *Environmental indicators and performance analysis*. Paris, 2020.
90. IPCC. *Emission scenarios and modelling approaches*. Geneva, 2019.
91. IEA. *Energy modelling and projections*. Paris, 2022.
92. World Bank. *Environmental monitoring and decision support systems*. Washington, 2021.
93. IEA. *Bioenergy market overview*. Paris, 2022.
94. Держенергоефективності України. Потенціал біоенергетики в Україні. Київ, 2022.
95. Bioenergy Europe. *Statistical Report*. Brussels, 2021.
96. Scarlat N., Dallemand J.-F. Biogas developments in Europe. *Renewable*

*Energy*, 2018.

97. Міністерство енергетики України. Стан та перспективи біоенергетики в Україні. Київ, 2023.

98. OECD. *Renewable energy trends*. Paris, 2021.

99. World Bank. *Bioenergy and energy security*. Washington, 2022.

100. European Environment Agency. *Environmental impacts of bioenergy*. Copenhagen, 2022.

101. ISO 14001:2015. Environmental management systems.

102. IPCC. *Bioenergy and climate change*. Geneva, 2022.

103. WHO. *Health impacts of biomass combustion*. Geneva, 2021.

104. FAO. *Water pollution from agro-industrial activities*. Rome, 2020.

105. Weiland P. Biogas digestate management. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010.

106. Lal R. Soil impacts of bioenergy crops. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019.

107. Searchinger T. Bioenergy and land use. *Science*, 2008.

108. OECD. *Circular economy and bioenergy*. Paris, 2021.

109. European Commission. *Circular bioeconomy strategy*. Brussels, 2020.

110. IEA. *Sustainability assessment of bioenergy*. Paris, 2022.

111. Scarlat N., Dallemand J.-F. Biogas sustainability in Europe. *Renewable Energy*, 2018.

112. Weiland P. Biogas production and environmental aspects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010.

113. Demirbas A. Bioethanol and environmental impacts. *Energy Policy*, 2009.

114. Searchinger T. et al. Land use change and biofuels. *Science*, 2008.

115. Knothe G. Biodiesel and emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010.

116. OECD. *Environmental risks of biofuels*. Paris, 2020.

117. IEA. *Bioenergy sustainability assessment*. Paris, 2022.

118. European Environment Agency. *Environmental impacts of bioenergy*. Copenhagen, 2022.
119. ISO 14001:2015. Environmental management systems.
120. IPCC. *Bioenergy and climate change*. Geneva, 2022.
121. WHO. *Health impacts of biomass combustion*. Geneva, 2021.
122. FAO. *Water pollution from agro-industrial activities*. Rome, 2020.
123. Weiland P. Biogas digestate management. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010.
124. Lal R. Soil impacts of bioenergy crops. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019.
125. Searchinger T. Bioenergy and land use. *Science*, 2008.
126. OECD. *Circular economy and bioenergy*. Paris, 2021.
127. European Commission. *Circular bioeconomy strategy*. Brussels, 2020.
128. IEA. *Sustainability assessment of bioenergy*. Paris, 2022.
129. Hill T., Westbrook R. SWOT analysis: It's time for a product recall. *Long Range Planning*, 1997.
130. Держенергоефективності України. Біоенергетичний потенціал України. Київ, 2022.
131. IEA. *Energy security and bioenergy*. Paris, 2021.
132. OECD. *Renewable energy policy review*. Paris, 2021.
133. World Bank. *Investment barriers in bioenergy*. Washington, 2020.
134. European Commission. *Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001*.
135. UNEP. *Green recovery and bioenergy*. Nairobi, 2021.
136. FAO. *Biomass supply risks*. Rome, 2020.
137. Lal R. Environmental risks of land use change. *Soil Science*, 2019.
138. IEA. *Bioenergy outlook*. Paris, 2022.
139. IPCC. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva, 2019.
140. European Commission. *Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001 (RED II)*.

141. IEA. *Greenhouse gas emissions from bioenergy*. Paris, 2022.
142. Bioenergy Europe. *GHG savings from biomass*. Brussels, 2021.
143. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment.
144. Finnveden G. et al. Life cycle assessment of energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 2018.
145. IPCC. *Climate Change Mitigation*. Geneva, 2022.
146. European Environment Agency. *Air quality impacts of energy production*. Copenhagen, 2021.