

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра екології і природозахисних технологій

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 101 «Екологія»

Тема: «Екологічно безпечні процеси рециклінгу відходів з отриманням біоводню та інших біопродуктів».

Завідувач кафедри

Пляцук Л.Д.

(прізвище, ім'я по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник проєкту

Черниш Є.Ю.

(прізвище, ім'я по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультанти:

з охорони праці

Васькін Р.А.

(прізвище, ім'я по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

з економічної частини

Павленко О.О.

(прізвище, ім'я по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Виконавець

студент групи ТС – 91

Шуліпа Є.О.

(прізвище, ім'я по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Суми 2020

Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра екології і природозахисних технологій  
Спеціальність 101 «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Зав. кафедрою \_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**  
**ШУЛПИ ЄЛИЗАВЕТИ ОЛЕКСАНДРІВНИ**

1. Тема проєкту (роботи): «Екологічно безпечні процеси рециклінгу відходів з отриманням біоводню та інших біопродуктів».

затверджена наказом по університету від 23 листопада 2020 р. № 1810-III.

2. Термін задачі студентом закінченого проєкту (роботи): 12 грудня 2020 року.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): Зарубіжні та вітчизняні публікації і наукові видання. Онтологічні інструменти та методи дослідження біоінформаційних та наукометричних баз даних: KEGG database, BacDive, EAWAG-BBD та БД Scopus. Програмне забезпечення візуалізації VOSviewer. Методика для оцінки кінцевої вартості виробництва водню (2008 р.).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): Огляд екологічної проблематики поводження з органічними відходами та шляхів її вирішення з використанням біопроеесів. Обґрунтування ефективності залучення відновних джерел енергії в сферу рециклінгу органічних відходів різного генезису. Опис онтологічних інструментів та методів моделювання біопроеесів рециклінгу органічних відходів. Розроблення інтегрованої моделі біопроеесів екологічно безпечного продукування водню і метаногенерації на стадіях анаеробної ферментації відходів. Економічне оцінювання впровадження систем виробництва водню із біогазу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Рисунки: Вплив тваринництва на викиди парникових газів; класифікація технологій перетворення енергії біомаси; схема анаеробного бродіння та процесу темної ферментації; схеми рідкофазної, твердофазної біогазової установки, еластичного і двокамерного біогазового реактору; пошук необхідних родів та видів бактерій, що задіяні в процесі метаногенезу і доміантних видів метаногенів; карта шляху метаногенезу; застосування інструментів БД Scopus; мережеві і накладні візуалізації досліджень отримання біометану і біоводню; модель

комбінації процесів виробництва водню та метану; чинники екологічної безпеки процесів анаеробної ферментації.

Таблиці: Енергетичний потенціал відходів тваринницького комплексу України; частка відходів на 1 т вироблення сільськогосподарської продукції; вихід біогазу і вміст у ньому метану при використанні різних видів відходів; вміст азоту у різних видах органічних відходів; передбачувані витрати на компоненти установки і постійні витрати на експлуатацію та обслуговування; загальна вартість обладнання; порівняння нормованої вартості водню.

6. Консультанти по проекту (роботі), із значенням розділів проекту, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Васькін Р.А.		
Економічна частина	Павленко О.О.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Літературний огляд за проблематикою дослідження	01.04.20– 24.05.20	
2.	Робота над вступом, визначення мети, завдань та методів дослідження	01.06.20 – 30.06.20	
3.	Пошук напрямів комбінації процесів анаеробної ферментації відходів	01.07.20 – 30.09.20	
4.	Обґрунтування біохімічних процесів інтенсифікації рециклінгу відходів	01.10.20– 13.10.20	
5.	Розроблення моделі кластерів розвитку досліджень темної ферментації та метанового збродження органічних відходів	14.10.20 – 22.10.20	
6.	Розроблення інтегрованої моделі чинників екологічної безпеки процесів метаногенезу та генерації біоводню	25.10.20 – 31.10.20	
7.	Здійснення економічного оцінювання процесу виробництва водню із біогазу	01.11.20 – 15.11.20	
8.	Робота над розділом «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях»	16.11.19 – 06.12.19	
9.	Оформлення дипломного проекту	09.12.19 – 12.12.19	

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник проекту \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

*Структура та обсяг випускної кваліфікаційної роботи магістра.* Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, переліку джерел посилання, який містить 57 найменувань та двох додатків. Загальний обсяг магістерської роботи становить 79 с., у тому числі 12 таблиць, 29 рисунків, список використаних джерел 7 сторінок.

*Мета роботи* – моделювання екологічно безпечних процесів біологічної утилізації органічних відходів з отриманням енергетичних ресурсів та корисних біопродуктів.

Для досягнення зазначеної мети було вирішено такі завдання:

- визначити напрями екологічно безпечного поводження з відходами під час їхнього використання в біопроцесах захисту довкілля;
- здійснити розроблення методологічної основи моделювання біопроцесів рециклінгу відходів з використанням онтологічних інструментів та методів;
- здійснити моделювання кластерів розвитку досліджень темної ферментації та метанового збродження органічних відходів;
- розробити інтегровану модель чинників екологічної безпеки процесів метаногенезу та генерації біоводню.

*Об'єкт дослідження* – екологічна безпека процесів утилізації органічних відходів.

*Предмет дослідження* – процес анаеробної ферментації органічних відходів задля отримання біоводню, біометану та інших корисних біопродуктів.

У ході кваліфікаційної роботи було проаналізовано вплив комплексів с/г на НС, виокремлено напрями екологічно безпечного поводження з органічними відходами, в т.ч. і з використанням методів біотехнології. Досліджено основи темної ферментації та необхідне апаратне оснащення процесів. Розроблено методологію моделювання біопроцесів рециклінгу відходів за допомогою різноманітних онтологічних інструментів. Змодельовано кластери розвитку досліджень у галузях темної ферментації і метанового бродіння біомаси. Розглянуто вплив добавок та ко-субстратів на перебіг процесу анаеробного збродження. Розроблено інтегровану модель комбінації процесів отримання водню та метану, виокремлено чинники екологічної безпеки процесів генерації. Проведена економічна оцінка впровадження систем таких виробництв. Вивчено небезпечні та шкідливі фактори, що впливають на працівників при поводженні з відходами. Вивчено особливості інженерної обстановки надзвичайних ситуацій.

*Ключові слова:* БІОВОДЕНЬ, БІОМЕТАН, ОРГАНІЧНІ ВІДХОДИ, АНАЕРОБНЕ ФЕРМЕНТУВАННЯ, ОНТОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЕКОЛОГІЧНОЇ ПРОБЛЕМАТИКИ ПОВОДЖЕННЯ	3
ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ ТА ШЛЯХІВ ЇЇ ВИРІШЕННЯ	3
ВИКОРИСТАННЯМ БІОПРОЦЕСІВ.....	8
1.1 Вплив фермерських господарств та тваринницьких комплексів на довкілля.....	8
1.2 Залучення відновних джерел енергії в сферу рециклінгу органічних відходів різного генезису.....	12
1.3 Використання процесу метанового бродиння та темної ферментації в технологіях переробки відходів.....	17
1.4 Порівняльна характеристика апаратного оснащення для біологічної переробки органічних відходів.....	24
РОЗДІЛ 2. ОНТОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ ТА МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ БІОПРОЦЕСІВ РЕЦИКЛІНГУ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ.....	29
2.1 Використання біоінформаційних електронних баз даних: KEGG database, VacDive та EAWAG-BBD.....	29
2.2 Аналітичні інструменти наукометричної бази даних Scopus в аналізі тенденцій розвитку біоенергетичних технологій анаеробної ферментації.....	34
2.3 Застосування методів візуалізації за допомогою VOSviewer програми для побудови графів мережевого аналізу та тенденцій у сфері дослідження.....	37
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ АНАЕРОБНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ З ОТРИМАННЯМ БІОВОДНЮ ТА ІНШИХ БІОПРОДУКТІВ.....	38
3.1 Візуалізація трендів та мережевий аналіз у сфері досліджень темної ферментації відходів за допомогою VOSviewer програми.....	38
3.2 Вивчення впливу різних концентрацій мінеральних добавок та ко-субстратів на процес двох стадійної анаеробної ферментації з отриманням біоводню та інших біопродуктів.....	45
3.3 Розроблення інтегрованої моделі біопроектів екологічно безпечного продукування водню і метаногенерації на стадіях АФ відходів.....	50
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ ІЗ БІОГАЗУ.....	55
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НС.....	64
5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що виникають під час процесів рециклінгу відходів.....	64
5.2 Оцінка інженерної обстановки та соціально – економічних наслідків НС.....	66
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	71
ДОДАТОК А.....	78
ДОДАТОК Б.....	79

Підп. і дата						ЕК 19510242					
Підп. і дата											
Взаєм. інв. №											
Інв. № доубл.											
Вид											
Арк											
№ докум.											
Підп.											
Дата											
Інв. № подл.						Екологічно безпечні процеси рециклінгу відходів з отриманням біоводню і інших біопродуктів					
Розроб.											
Перев.											
Н.Контр											
Затв.									СумДУ, ф-т ТеСЕТ гр. ТС.м-91/2 ОС		

## ВСТУП

Сьогодні у світі виробництву біоводню та біометану з відходів приділяється підвищена увага, оскільки воно потенційно може знизити викиди CO<sub>2</sub> за рахунок виробництва відновлюваної енергії і обмежити викиди парникового газу метану від органічних відходів тваринницьких комплексів, муніципалітетів тощо. Ця тенденція підтримується зростаючим ринковим попитом на «зелену» енергію і суттєвою оптимізацією технологій анаеробного зброджування за останні десятиліття, особливо розвитком сучасних «високошвидкісних» систем і систем спільного зброджування різних видів відходів. Крім того, цьому наряду приділяється важлива увага у країнах ЄС, формується потужний пласт проєктів, що фінансуються через грантові міжнародні системи, які об'єднують організації партнерів із різних країн.

Загалом, більшість відходів можна розглядати як відновлювані ресурси. Але на даному етапі переробка не всіх відходів є економічно доцільною, хоча їх повторне використання й може зменшити техногенний вплив на навколишнє середовище.

Найбільш широко використовуваними методами поводження з органічними відходами в Україні є депонування, компостування або спалення з похованням залишків. Але ці традиційні методи їх перероблення призводять до хімічного та біологічного забруднення, погіршення умов праці персоналу, тощо. У зв'язку з цим, питання пошуку ефективних екологічно безпечних методів знешкодження органічних відходів постає практично перед усіма країнами світу і є одним із найактуальніших в галузі екологічної безпеки для України.

**Метою даного дослідження** є моделювання екологічно безпечних процесів біологічної утилізації органічних відходів з отриманням енергетичних ресурсів та корисних біопродуктів.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі **завдання**:

- визначити напрями екологічно безпечного поводження з відходами

Підп. і дата
Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дата
Інв.№подр.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ЕК 19510242	Арк
						5

під час їхнього використання в біопроцесах захисту довкілля;

– здійснити розроблення методологічної основи моделювання біопроцесів рециклінгу відходів з використанням онтологічних інструментів та методів;

– здійснити моделювання кластерів розвитку досліджень темної ферментації та метанового збродження органічних відходів;

– розробити інтегровану модель чинників екологічної безпеки процесів метаногенезу та генерації біоводню.

**Об’єкт дослідження** – екологічна безпека процесів утилізації органічних відходів.

**Предмет дослідження** – процес анаеробної ферментації органічних відходів задля отримання біоводню, біометану та інших корисних біопродуктів.

**Методи дослідження.** У роботі використовували онтологічні інструменти та методи дослідження біопроцесів рециклінгу відходів із залученням біоінформаційних та наукометричних баз даних: KEGG database, BacDive, EAWAG-BBD та БД Scopus. Також застосовували методи теоретичного біохімічного аналізу процесів ферментації, індикаційного аналізу еколого–трофічних груп організмів. Крім того, для дослідження трендів розвитку анаеробних процесів генерації «зеленої» енергії було застосовано спеціальне програмне забезпечення візуалізації, а саме VOSviewer.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Запропоновано концепцію інтегрованого застосування різних типів онтологічних інструментів для теоретичного дослідження та біохімічного моделювання напрямів біологічної утилізації відходів з отриманням корисних біопродуктів на основі сучасних біоінформаційних, наукометричних та візуалізаційних методів аналізу. Визначено біохімічні зв’язки при стадійному обробленні органічних відходів з генерацією біоводню та біометану під час впливу різних мінеральних добавок. Запропоновано інтегровану модель чинників екологічної безпеки процесів метаногенезу та генерації біоводню.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	EK 19510242	Арк
						6

**Практичне значення одержаних результатів.** Сформовано комплекс методичної підтримки екологічних досліджень, що містить інтегровану систему онтологічних інструментів вибору параметрів процесу анаеробної ферментації відходів. Здійснено проектування напрямів комбінації біопроектів виробництва водню та метану з урахування екологічних чинників впливу одержаних біопродуктів.

**Особистий внесок здобувача.** Магістерська робота є самостійним, завершеним дослідженням автора у галузі екології. Усі основні положення кваліфікаційної роботи, які винесено на захист, одержано автором самостійно. Автор зібрала статистичний матеріал, виконала його оброблення за допомогою різних онтологічних інструментів, аналіз і наукове узагальнення; обґрунтувала методику дослідження і вирішила поставлені в роботі завдання. Провела біохімічне та кластерне моделювання процесу стадійної анаеробної ферментації з отриманням екологічно безпечних біопродуктів та відновних джерел енергії.

Апробація: інформація з кваліфікаційної роботи доповідалася у наступних конференціях під такими назвами:

1. V і VI Міжнародні науково-практичні конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих учених «Галузеві проблеми екологічної безпеки» (м. Харків, 2019 р., 2020 р.);

2. Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт зі спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища» (м. Одеса, 2020 р.);

3. V Всеукраїнський конкурс «Молодь і прогрес у раціональному природокористуванні» (м. Київ, 2020 р.);

4. VII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2020 р.);

5. 6-й Міжнародний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 2020 р.);

6. Shulipa, Ye. O., Chernysh, Ye. Yu., Plyatsuk, L. D., Fukui, M. (2020). Ontological tools in anaerobic fermentation technologies: Bioinformation database applications. Journal of Engineering Sciences, Vol. 7(1), pp. H1–H8.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<b>EK 19510242</b>	Арк
						7



# РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЕКОЛОГІЧНОЇ ПРОБЛЕМАТИКИ ПОВОДЖЕННЯ З ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ ТА ШЛЯХІВ ЇЇ ВИРІШЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ БІОПРОЦЕСІВ

## 1.1 Вплив фермерських господарств та тваринницьких комплексів на довкілля

Утримання та розведення сільськогосподарських тварин або птиці у великих масштабах, коли їх поголів'я на окремих фермах сягає тисяч, сотень тисяч або навіть мільйон голів вважається промисловим тваринництвом.

Розвиток тваринництва, з одного боку, забезпечує населення необхідними продуктами харчування, рослинницьку галузь — органічними добривами, що сприяє підвищенню родючості ґрунту, збільшенню вмісту поживних елементів у ньому, активізує розвиток мікроорганізмів, які беруть активну участь у процесах гумусоутворення, впливають на склад ґрунтового повітря, цикли перетворення азотовмісних сполук, однією з важливих ланок яких є фіксація азоту ґрунтовими мікроорганізмами. З іншого боку, розвиток тваринництва на промисловій основі, забезпечення сильної кормової бази, розширення територій вигінних пасовищ, значна кількість поголів'я худоби на обмеженій площі, заміна звичних форм його сутності є причинами використання великої кількості води з річок, озер та інших водних об'єктів, що залишає істотний відбиток на стані самих водойм і прилеглих територій в цілому [1].

У світовому масштабі майже четверта частина усієї прісної води, яка використовує людина, йде на потреби тваринництва або суміжних галузей. Залежно від потужності, одна промислова ферма використовує 300–500 м<sup>3</sup> води на добу, що прирівнюється до водоспоживання невеликого селища.

Окрім значного водозабору, промислове тваринництво згубно впливає на довкілля через викиди аміаку, метану та інших газів у повітря. Згідно оцінок Всесвітньої організації з продовольства та сільського господарства,

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
------------	--------------	-------------	------------	--------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

тваринництво продукує близько 18% від загальних викидів парникових газів – у порівнянні з викидами від транспорту – це більший відсоток. Від гною та посліду утворюються викиди 17 % загального обсягу викидів оксиду азоту, який є одним із небезпечних парникових газів. Також галузь розведення тварин вважається одним з основних джерел викидів амоніаку через накопичення великих об’ємів гною та посліду. Амоніак потрапляє в атмосферу головним чином під час утворення гною та посліду на пасовищах при вільновигульному утриманні тварин, зберіганні гною та посліду в лагунах та внесенні їх на с/г угіддя (рис. 1.1) [1-2].

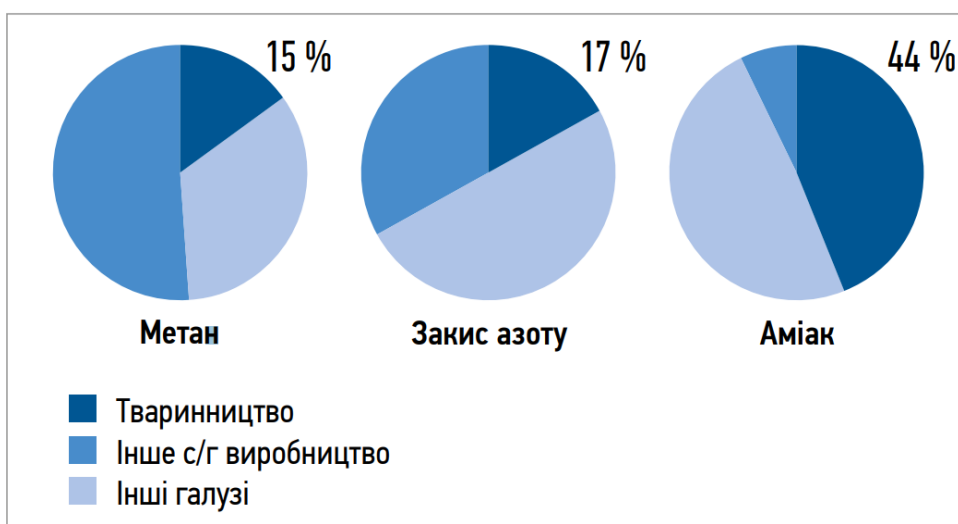


Рисунок 1.1 – Вплив тваринництва на викиди парникових газів [2]

Однією з найбільших екологічних проблем промислових ферм є утворення великої кількості гною або посліду. У даний час в Україні відсутні жорсткі вимоги до утилізації відходів фермами. Отже вони можуть накопичуватися та зберігатися у пристосованих сховищах (з можливим подальшим компостуванням, або вермикультивуванням частини фракції), відправлятися на біологічне перетворення в анаеробних умовах для одержання біогазу, фізико-хімічній або механіко-біологічній обробці [3].

На практиці, більшість тваринних господарств використовують саме варіант накопичення та зберігання відходів – гній та послід накопичуються та

Інв.№поділ.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

EK 19510242

зберігаються деякий час у лагунах (переважно відкритого типу). Після чого вносяться на поля у якості органічного добрива. Даний тип поводження з відходами не є екологічною проблемою, якщо ферма невелика і не утворює значної кількості відходів, при цьому повністю дотримуються правила безпеки поводження з відходами та режим внесення відходів у ґрунти. При даних умовах відходи тварин є цінним органічним добривом. Негативний вплив проявляється при порушенні правил поводження з органічними відходами і у випадках застосування такого методу на великих промислових фермах. Дані господарства утримують поголів'я у сотні тисяч голів тварин або мільйони голів птахів на рік і, тому, тисячі м<sup>3</sup> відходів поміщають у лагуни та зберігають деякий час перед винесенням на поля.

Забруднення компонентів довкілля багато в чому визначається складом гнойових стоків, які залежить від таких основних факторів: виду сільськогосподарських тварин, їх чисельності, якості та кількості кормів, росту, статі та маси тварин, напряму тваринництва, способу утримання та способів видалення гною. Рідкий гній містить велику кількість патогенних організмів, в процесі анаеробного ферментування утворюються шкідливі гази (сірководень, аміак та ін.), а також жирні кислоти, аміни та інші сполуки, що відрізняються неприємним запахом. Тому, якщо належного контролю за його збереженням та використанням немає, тоді виникає реальна загроза розповсюдження інфекційних хвороб у зоні тваринницьких комплексів [4].

При зберіганні тисяч м<sup>3</sup> відходів у лагунах можливе непередбачуване протікання гноївки у компоненти довкілля через розгерметизацію лагун, змив, перевищення лімітів наповнення лагун. Більш того, органіка може вноситися у ґрунт із частотою та в обсягах, що перевищують норми. При понаднормовому внесенні, подальшому потраплянні до підземних та поверхневих вод, гній та послід стають забрудниками [2].

Через порушення технології утримання тварин та зберігання відходів, N, P та інші поживні речовини потрапляють у поверхневі води, забруднюючи їх і

Інв.№попл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

10

завдаючи шкоди водно-болотним угіддям і прибережним екосистемам. При цьому починається процес евтрофікації водойми, тобто її збагачення біогенними елементами. Це у свою чергу спричинює бурхливий розвиток водоростей і збільшення кількості зоопланктону, через що прозорість води різко знижується, проникнення сонячних променів зменшується, що призводить до загибелі водоростей та бактерій, які надто розмножились у верхніх горизонтах водойми. У процесі їх розкладання в анаеробних умовах запаси кисню вичерпуються, а замість цього утворюються сильні отрути - феноли та сірководень, що викликають отруєння всіх живих організмів у водоймі [1].

Через просочування N, P та інших речовин із гною або посліду до підземних вод відбувається забруднення горизонтів питного водопостачання [3].

При внесенні великих об'ємів гною в ґрунт відбувається їх зафосфачування і забруднення важкими металами. Таке підживлення для с/г культур в результаті може призвести до зниження родючості ґрунтів.

Промислове тваринництво є також одним із потенційних забруднювачів ґрунтів і води патогенними мікроорганізмами. З метою запобігання хворобам близько половини всіх антибіотиків у світі, які застосовує людина, припадає саме на галузь тваринництва [1].

Надмірне використання антибіотиків на тваринницьких комплексах призводить до утворення і розповсюдження вірусів і бактерій, стійких до антибіотиків. Потрапляючи в навколишнє середовище, вони спричинюють захворювання тварин та людей. Наприклад, у складі відходів ферм може бути присутня смертельно небезпечна бактерія, що стійка до антибіотиків — метицелін-резистентний стафілокок. Промислові ферми можуть бути також основними осередками виникнення або поширення свинячого або пташиного грипу [1,3].

Враховуючи проблеми з відходами тваринництва, поводження з ними вимагає жорсткого регулювання, особливо для промислових ферм.

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

11

## 1.2 Залучення відновних джерел енергії в сферу рециклінгу органічних відходів різного генезису

В умовах загострення проблеми енергозабезпечення України, виникає необхідність проаналізувати структуру існуючих джерел енергії на користь технологій, що використовують відновлювані ресурси. Одним з перспективних напрямків вирішення проблеми є виробництво та використання біопалива. Україна має досить необхідних умов для розвитку цього напрямку відновлювальної енергетики. Насамперед, в країні активно розвивається сектор сільського господарства, який є джерелом великого обсягу різних відходів та залишків. Саме відходи сільського господарства складають найбільшу частину потенціалу біомаси, але при цьому часто утилізуються без принесення користі. На додаток, використання відновлювальних джерел енергії вирішуватиме низку важливих завдань, таких як: зниження залежності від імпорту енергоносіїв, розвиток агропромислового комплексу, створення нових робочих місць і нарешті поліпшення екологічної ситуації в країні. Нажаль, темпи розвитку біоенергетики в Україні не такі швидкі, у порівнянні зі світовими показниками. Великих успіхів у цьому секторі досягла Європа, досвід якої є дуже цінним для України [5].

Органічні відходи можна класифікувати за основними галузями виробництва та споживання:

- сільське господарство (рослинництво, тваринництво);
- харчова, переробна промисловість;
- деревообробна промисловість;
- муніципальний сектор.

У сільському господарстві органічні відходи можна поділити на відходи рослинництва та відходи тваринництва.

Відходи галузі розведення тварин вважаються одними з найперспективніших джерел для отримання енергії шляхом анаеробної

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

ЕК 19510242

Арк

12

ферментації в біореакторах. Вони є в будь-якому господарстві, не вимагають попередньої обробки і сортування, їх не важко транспортувати [6].

Потенціал відходів тваринництва для їх використання в системах біоконверсії з метою енергозбереження в Україні значний (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Енергетичний потенціал відходів тваринницького комплексу України (станом на 2007 р) [6]

Джерело відходів	Вихід відходів, $10^6$ т/рік	Вихід біогазу, $10^9$ м <sup>3</sup> /рік	Нижча теплота згорання $Q_{нр}$ , МДж/м <sup>3</sup>	Енергетичний потенціал відходів, млн. т. у. п./рік
Велика рогата худоба	58,4	1,46	23	1,144
Свині	4,79	0,124	21	0,088
Птахи	2,8	0,11	21	0,079
Всього	65,99	1,694	-	1,311

У коливанні поголів'я домашньої худоби закріпилася схильність до зменшення числа тварин у великих господарствах, але зростання їх числа у малих. Таким чином, загальний об'єм відходів на виході, які можна використати в системах біоконверсії, залишається майже незмінною [6].

Для виробництва енергії можуть використовуватися будь-які рослинні відходи з високим вмістом целюлози - солома, стебло кукурудзи, соняшник та інші культури. Полісахарид побудований з елементарних ланцюгів ангідро-глюкози, тобто полі-1,4- $\beta$ -D глюкопіранозил-D-глюкопіранози [7].

Численні дослідження показали, що солома зернових культур, ріпака, а також відходи кукурудзи та соняшнику за своїми енергетичними характеристиками фактично не поступаються енергетичним характеристикам деревини (табл. 2.1). Але спалювання тюків соломи вважається непрактичним

Інв.№поодл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

EK 19510242

Арк

13

через невисокий коефіцієнт корисної дії установок (солома має низьку щільність і порівняно високу вологість) та незручності через великі габарити. Тому виготовлення твердого палива (пелет або брикетів) з рослинних залишків вважається найбільш раціональним і дозволяє скоротити витрати вичерпних природних ресурсів [8].

Таблиця 1.2 – Частка відходів на 1 т вироблення сільськогосподарської продукції [8]

Вид с/г культур	Вид відходів	Залишки виробництва на 1 т готової продукції
Рис	Солома,лушпиння	1,5 відходів
Пшениця	Солома,лушпиння	1,7 відходів
Кукурудза	Солома,листя	2,0 відходів
Ячмінь	Солома,висівки	1,2 відходів

Брикетування соломи дозволяє вирішити і проблему зберігання сировини незалежно від пори року (брикет може зберігатися за оптимальних умов необмежену кількість часу), і питання складування, перевезення, автоматизації завантаження в печі. Під час виготовлення такого виду палива основними етапами технологічного процесу є: подрібнення біомаси, сушіння, гранулювання або пресування, охолодження та упаковка [8].

Під час спалювання, пшенична солома продукує 17–18 МДж/кг (4060,38–4299,23 ккал) тепла, рапсова солома – 16–17 МДж/кг (3821,53–4060,38 ккал), кукурудзяна – 18 МДж/кг (4299,23 ккал). Варто відзначити, що теплоємність деревини коливається в межах від 17,5 до 19 МДж/кг (4179,80– 4538,07 ккал). Слід додати, що прийнявши теплотворну здатність за основну паливно-технологічну характеристику, можна сказати, що вона залежить від декількох факторів: генетичних особливостей рослин з енергетичним потенціалом, впливу довкілля, умов зберігання, вологості тощо [9].

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

14

У харчовій та переробній промисловості утворюється великий обсяг твердих і рідких відходів. До відходів цих галузей належать відходи м'ясної та молочної промисловості, фруктові, овочевої, алкогольної, виробництва олій на молочних підприємствах тощо. До відходів належать відходи з кексу та олійки, що утворюються в процесі переробки нафти (підкислений супп, фільтруючі порошки, а також дистилат, що утворюється при дезодоруванні масел). Найефективнішими методами переробки таких відходів є піроліз та газифікація з можливістю отримання водню, легкозаймистих газових сумішей, активованого вугілля тощо.

*Класифікація джерел енергії з відходів та способи їх отримання.* У процесі переробки відходів, що використовуються для енергетичних цілей, можуть бути утворені різні джерела енергії:

- газоподібні - піролізний газ, біогаз синтез-газ, метан;
- рідкі - горючі смоли, біодизель, біоетанол та ін.
- тверді речовини - деревне вугілля, залишки вугілля, кокс тощо;
- тепла енергія в термогенераторах, газогенераторах, піролізних та когенераційних установках;
- електрична енергія в парових турбінах, газотурбінних та газопоршневих двигунах [7].

Технології використання органічних відходів постійно вдосконалюються, забезпечуючи отримання енергії в придатній для споживача формі й з максимально можливою ефективністю.

Найефективнішими технологіями використання біомаси задля отримання енергії є: пряме спалювання; піроліз; газифікація; анаеробне збродження з утворенням біогазу; виробництво спиртів і масел для отримання моторного палива.

Загалом, енергія з органічних відходів отримується фізичними, хімічними або мікробіологічними методами [10].

Підп. і дата	Інв. № дубл.	Взаєм. інв. №	Підп. і дата	Інв. № подл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<b>EK 19510242</b>	Арк
						15



Фізичним методом енергію отримують за допомогою спалювання біомаси. В основу хімічного методу закладено використання процесів піролізу і газифікації. Розповсюдженим є мікробіологічний метод безвідходного виробництва – отримання біогазу від анаеробної ферментації. Дуже цінним продуктом цього виробництва є дигестат, що вважається високоякісним органічним добривом [11].

Класифікація технологій з поетапним перетворенням біомаси в енергетичні продукти представлена на рис. 1.2 [10].

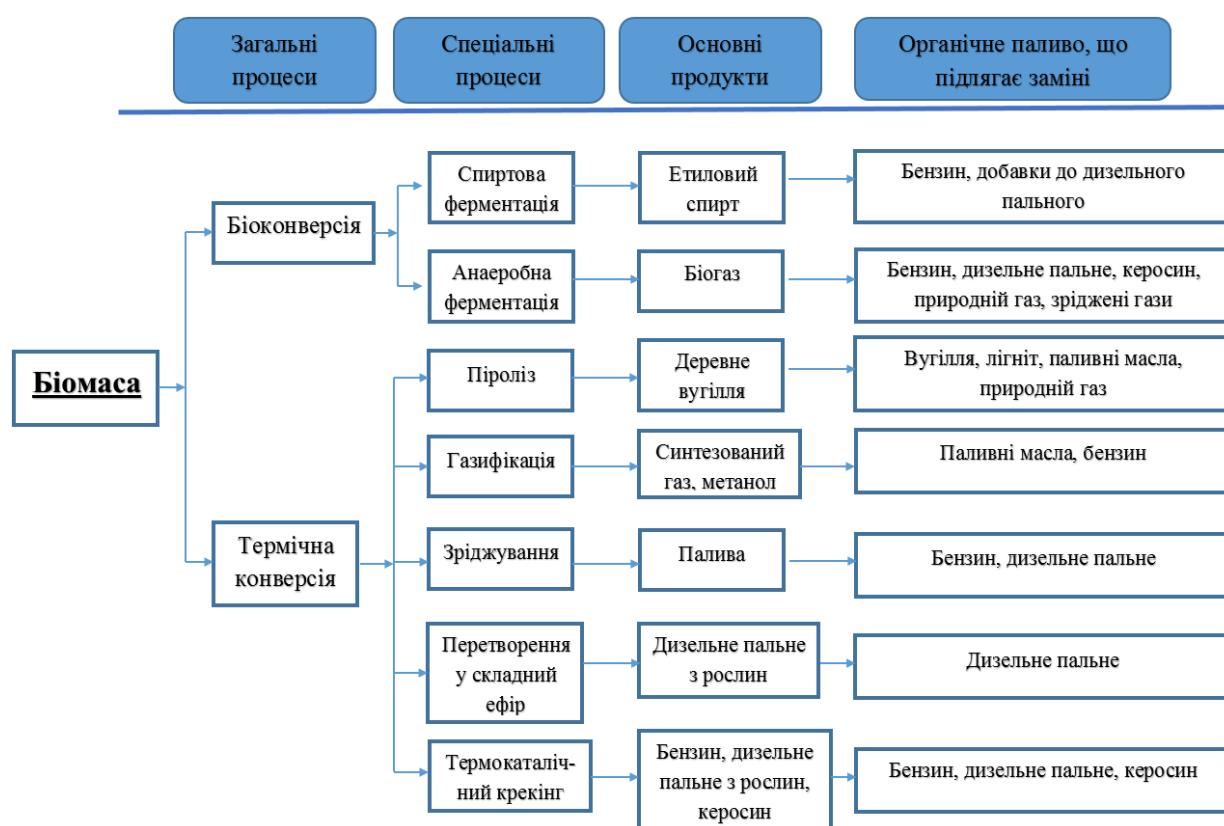


Рисунок 1.2 – Класифікація технологій перетворення енергії біомаси [10]

Пряме спалювання біомаси в атмосфері повітря або кисню – один з найстаріших способів продукування теплової енергії. Проте існує кілька проблем його практичного використання, основною з яких є досягнення найбільш повного згоряння палива, в результаті якого утворюються CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O, що не завдає шкоди довкіллю. До технічних пристроїв, які застосовуються при

Підп. і дата	
Інв. № доubl.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

прямому спалюванні органіки, відносяться печі, топки, камери згорання. Органіка може застосовуватися при прямому спалюванні в енергетичних установках у факелі, киплячому або ущільненому шарі з отриманням теплової або електричної енергії. Основна промислова технологія цього напрямку – пряме спалювання в котлі й генерація електроенергії в паротурбінній установці [11].

Піроліз біомаси - це термічний розпад сировини, що відбувається за відсутності кисню. Продукти піролізу біомаси включають біовугілля, біомасло та газу, включаючи метан, водень, окис вуглецю та діоксид вуглецю. Залежно від використовуваних умов (температури, тиску та часу горіння) виробляються різні пропорції піролізної олії, газу та вугілля. Розроблений ряд технологічних процесів піролізу органіки, експлуатаційні умови яких визначаються природою сировини, методами переробки і заданими продуктами виробництва [12].

### 1.3 Використання процесу метанового бродіння та темної ферментації в технологіях перероблення відходів

Одним із перспективних напрямів для України є перетворення біомаси за використання анаеробного зброджування з утворенням біогазу, який у подальшому власне і використовується для виробництва енергії або палива.

Темнова ферментація відходів на сьогодні дуже активно розвивається в країнах Західної Європи, зокрема у Німеччині [3].

У процесі метанового бродіння складні органічні речовини розкладаються на CO<sub>2</sub> і CH<sub>4</sub> з утворенням біогазу у вигляді суміші CO<sub>2</sub> і CH<sub>4</sub>. При цьому частка метану у суміші може становити до 70% [13].

Анаеробне перетворення складної органічної речовини будь –якого складу на біогаз відбувається шляхом перебігу 4 основних етапів :

- стадія гідролізу складних біополімерних молекул (білків, ліпідів, полісахаридів і ін.) на простіші мономерні: амінокислоти, вуглеводи, жирні кислоти та ін.;

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

- стадія ферментації (бродиння) мономерів, що утворилися, до ще простіших речовин - нижчих кислот і спиртів, при цьому утворюються також вуглекислота і водень;
- ацетогенна стадія, на якій утворюються безпосередні попередники метану: ацетат, водень, вуглекислота;
- метаногенна стадія, яка веде до кінцевого продукту розщеплювання складних органічних речовин – метану.

Варто додати, що між стадіями гідролізу і бродиння відсутня чітка межа, тому що звичайно мікроорганізми, що володіють гідролітичною активністю, використовують продукти гідролізу розщеплених ними з'єднань для свого зростання [14].

Найкращим чином ферментація проходить при 30 - 40 ° С (розвиток мезофільної бактеріальної флори) і при 50 - 60 ° С (розвиток термофільної бактеріальної флори). Вибір мезофільного або термофільного режиму роботи ґрунтується на аналізі кліматичних умов, тобто якщо для забезпечення термофільних температур потрібні значні витрати енергії, то більш ефективним є експлуатація біореакторів в мезофільному режимі. Найефективнішими вважаються реактори, які функціонують за термофільних умов при 43 - 52° С. На таких установках, з періодом ферментації відходів 3 дні, можна отримати 4,5 л біогазу на кожен л корисного об'єму реактора [15].

Жорсткість середовища для нормального процесу бродиння повинна коливатися від 1500 до 5000 мг CaCO<sub>3</sub> на 1 літр субстрату, а значення рівня кислотності (рН) бути в межах 6,5-7,5. Чим нижче рН, тим вище відсоток сірководню (H<sub>2</sub>S) в субстраті і біогазі, і тим вище токсичний потенціал. Незважаючи на це S є важливим поживним елементом субстрату, оскільки вона необхідна для утворення біомаси бактерій. Регулювання показника рН, як правило, здійснюється додаванням розчину вапна.

До речовин, що сповільнюють процес бродиння та знаходження яких у субстраті необхідно не допускати, належать солі важких металів, антибіотики,

Інв. №подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. №дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

18

аміак, розчинники, лужні метали, поверхнево активні речовини, що складають пральні засоби. Наприклад, гранично допустима концентрація міді складає 10 мг на 1 літр субстрату, нітратів – 50 мг/л., аміаку – 1500 мг/л [6].

Щоб уникнути переогодовування бактерій, субстрат в реактор найкраще подавати в рівній кількості через однаково короткі інтервали часу. Заповнення реактора 1-2 рази на день можливо тільки для субстратів, що мають високий буферний ефект (наприклад, екскременти тварин) або при дуже малій завантаженості реактора, якщо об'єм самого циліндра дуже великий.

Кожен з видів органічних відходів дозволяє отримати при анаеробному перетравленні певну кількість біогазу з різним вмістом у ньому метану (таблиця 1.3) [16].

Таблиця 1.3 – Відсоток виходу біогазу і вміст метану при збродженні відходів різного походження [6]

Вихідна сировина	Вихід біогазу на 1 кг сухої речовини, л/кг	Вміст метану (CH <sub>4</sub> ), %
Послід ВРХ	200 – 300	50
Послід свинячий	340 – 480	60 - 75
Кінський гній із соломою	250	56 - 60
Картопляне бадилля	420	60
Кукурудзяні стебла	420	53
Пшенична солома	342	58
Соняшникове лушпиння	300	60
Силос	250	84
Свіжа трава	360	52
Буряк	430	84
Відходи моркви	250	60
Деревна тирса	220	51
Тверда фракція осаду СВ	570	70
Фекальний осад	250 – 310	60
Домашні відходи і сміття	600	50

Інв. № докл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

19

Неорганічні добрива відразу стають доступними для рослин, але вони схильні до вилуговування - процесу, який відбувається, коли добрива змиваються дощем або поливної водою нижче рівня коренів рослин. Важкі внесення можуть спалювати рослини і збільшувати концентрацію токсичних солей в ґрунті, що може створити хімічний дисбаланс. Тому розвиток напряму біологічної утилізації органічновмісних відходів з отриманням, окрім біопалива, також органічного добрива є екологічно доцільним. Органічне добриво може також збільшити концентрацію деяких поживних речовин, але накопичення токсичності малоімовірно, доки органічний матеріал може повністю розкластись. Крім того, оскільки органічні добрива виготовляються з природних джерел, у виробництві використовується лише обмежена кількість викопного палива. Це означає, що парниковий газ, що викидається в атмосферу, нижчий у виробництві органічних добрив, ніж у виробництві неорганічних добрив [17].

### 1.3.1 Процеси темної ферментації як спосіб отримання біоводню

Ферментативне виробництво водню — це ферментативне перетворення органічного субстрату в біоводень, що здійснюється групою бактерій за допомогою мультиферментативних систем в 3 етапи, що нагадують анаеробне збродження. Темнова ферментація не потребує світлової енергії, тому можливе неперервне виробництво водню з органічних сполук — вдень і вночі [18].

Темнове бродіння - це тип (перша частина) анаеробного процесу травлення, де цукри або гліцерин перетворюються на водень, вуглекислий газ та леткі жирні кислоти (масляну або оцтову) і залишаються, тобто не починають процес метаногенезу (рис. 1.3). Інгібування метаногенезу часто протікає шляхом впливу стресового фактору на бактерії, наприклад: теплового удару (кипіння або заморожування), різкої зміни рН, мікрохвиль, обробку ультразвуком, скручування або хімічних агентів.

Інв.№поذل.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп і дата
------------	--------------	-------------	------------	-------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

20

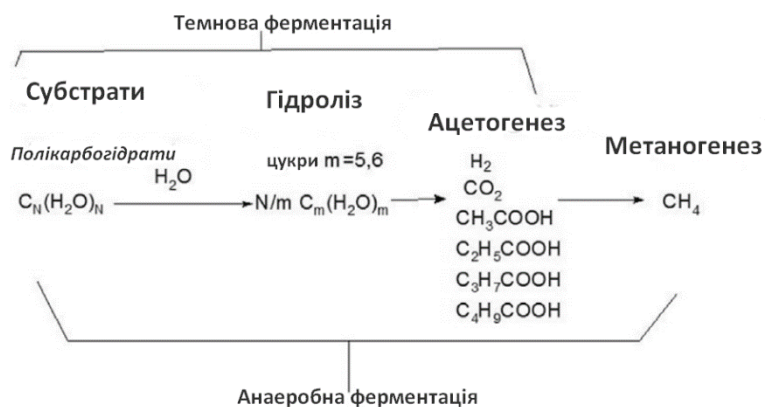
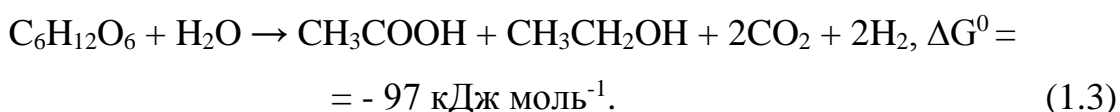
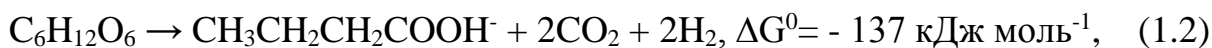
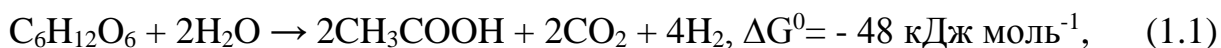


Рисунок 1.3 - Схема анаеробного бродіння та процесу темної ферментації

Процес темного бродіння з гексоз протікає по одному з термодинамічно можливих шляхів: ацетатного еквіваленту (1.1), бутиратного еквіваленту (1.2) або ацетат-етанолового еквіваленту (1.3).



Ацетатний шлях має найвищий теоретичний вихід водню: 4 моль  $H_2$  з 1 моль гексози. Найефективніший спосіб - це ацетатний шлях (1.1), але найпоширенішим є бутиратне бродіння (1.2).

У випадку пентоз реакція протікає відповідно до рівняння:



Хоча рівняння (1.1-1.4) відображають шляхи бродіння, починаючи з простих цукрів, у природі вони трапляються досить рідко. Отже, прості органічні сполуки потрібно отримувати із складних шляхом гідролізу (під час різних процесів попередньої обробки).

Підп. і дата	
Інв. № докл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № докл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<b>EK 19510242</b>	Арк
						21

Одним із відповідних (складних) джерел простих цукрів є лігноцелюлоза, основна складова рослин. Інший, спочатку попередньо оброблений, лігноцелюлозний матеріал можна отримати з посліду рослиноїдних тварин [19].

В якості основних субстратів можуть використовуватися різні органічні сполуки – такі як вуглеводи, цукри, білки і жири, комплексні органічні субстрати, наприклад, стічні води (СВ), багаті органічними речовинами: СВ харчової промисловості, СВ комунальних підприємств, відходи, які містять целюлозу та лігнінцелюлозу, СВ тваринних ферм, цукровмісні СВ, а також СВ, які містять залишки олій та гліцеролу [20].

Вихід водню під час темного бродіння значною мірою залежить від парціального тиску продукту. При високих значеннях парціального тиску водню метаболізм зміщується у бік виробництва більш відновлених продуктів — таких як лактат або аланін, тим самим знижуючи вихід  $H_2$  [21].

У ферментативному утворенні водню беруть участь багато мікроорганізмів. Ключову роль у регуляції метаболічних шляхів мікроорганізмів відіграють параметри зовнішнього середовища. Продукування водню може здійснюватися змішаними культурами, отриманими з природних середовищ, таких як ґрунт, активний мул, компост, чи чисті спеціально селекціоновані культури.

Серед воденьпродукуючих мікроорганізмів виділяють **облігатні анаероби**: *C. Butyricum*, *C. acetobutyricum* і *C. beijerinckii*, *C. Thermolacticum*, *C. tyrobutyricum*, *C. thermocellum* і *C. Paraputrificum*, *Clostridium tyrobutyricum*, і *paraputrificum*, *C. saccharoperbutylacetonicum*, **метилотрофи**, **метаногенні бактерії**, **археї**, **факультативні анаероби**: *E. coli*, *Ent-erobacter* (*E. aerogenes* і *E. cloacae*), *Citrobacter*, *Klebsiella* і навіть **аероби** (*Alcaligenes*, *Bacillus*) [20].

Процес зазвичай протікає в мезофільному діапазоні ( $33\text{ }^\circ\text{C}$  –  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ), однак останні повідомлення про більш високе виробництво метану та можливі більш цінні побічні продукти (наприклад, молочна кислота) викликали інтерес до збільшення теплового діапазону температур ( $55\text{ }^\circ\text{C}$  –  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ). Оптимальний рН для виробництва водню при темновій ферментації коливається залежно від

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<p style="text-align: center;"><b>EK 19510242</b></p>	Арк
						22

субстрату в межах 5,0–6,0, тоді як для виробництва метану він знаходиться в межах 7,0–9,0. Також, було встановлено, що під час бродіння субстратів з вищим вмістом лігніну (понад 10%), завдяки збільшенню рН, метаногени стимулюються до вищого виробництва метану (а виробництво нітрогену зменшується).

Аерація (або мікроаерація) - це техніка додавання повітря, що застосовується в багатьох біологічних процесах, таких як компостування, фотоферментація, мікробний електроліз і навіть анаеробне ферментування. Додавання 2–8% кисню полегшує виробництво водню в процесі ферментації. Встановлено, що додавання кисню в невеликих кількостях використовується в анаеробному травленні для інгібування утворення сірководню в реакторах. Оптимальна швидкість мікроаерації залежить від субстрату та типу реактора. Мікроаерація також покращує швидкість гідролізу та збільшує ступінь перетворення гідролізату. Таким чином, варто дослідити, який процес, метаногенез або гідрогенез (обидва анаеробні), є більш чутливим до присутності кисню, що може полегшити контроль цих процесів під час темної ферментації [22].

Процес темного бродіння вирізняється своїми перевагами. Бактерії – зброджені мають високий потенціал до утворення водню. Крім того, процес не вимагає світла і може проходити безперервно, протягом тривалого часу. В результаті окрім водню утворюються і проміжні метаболіти - оцтова кислота, що також знаходять широке застосування. Для процесу можуть бути використані різні субстрати. Ферментативне виділення водню є вигідним, у порівнянні з фотохімічним виділенням водню мікроорганізмами. Але у міру збільшення парціального тиску водню, його кількість зменшується і відбувається зрушення в бік отримання проміжних продуктів, таких як молочна кислота, етиловий спирт, ацетон, бутанол і ін. Іншим недоліком є виділення CO<sub>2</sub>, який повинен бути видалений з отриманої газової суміші [20].

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

23



#### 1.4 Порівняльна характеристика апаратного оснащення для анаеробного біологічного перероблення органічних відходів

Вибір біореактора має вирішальне значення в процесі виробництва біогазу. Залежно від технології підготовки і бродіння сировини існують 2 види сучасних біогазових установок: рідкофазна (вологість зброджуваної органічної маси більше 85%) і твердофазна (вологість органічної маси менше 85%) [23].

Для бродіння необхідно передбачити такі устрої: бродильний резервуар (метантенк), газгольдер (для створення тиску газу), пристрій управління і безпеки.

Бродильний резервуар повинен бути газо- та водонепроникним, протистояти агресивному впливу мулу, бути виготовленим з бетону, сталі, пластмас. Для прискорення виділення газу, зброджувану масу потрібно перемішувати. Це можна проводити механічним, гідравлічним способом або подачею утвореного газу. Для додаткового підігріву субстрату широко використовують енергію отриманого біогазу або підігрів відбувається за рахунок завантаження свіжого гною. Газгольдер потрібен для збору газу, він задає певний тиск (0,05– 200 бар) [8].

Як правило, реальні установки мають два метантенки. Метанове перетворення проходить в первинному метантенку (ферментері), температура в якому повинна коливатися в межах 35–40° С. Суміш, що надходить сюди, перемішується до однорідного стану. Остаточне доброджування і подальше зберігання відбувається у вторинному реакторі, який також під'єднаний до газової мережі установки. Очищення біогазу від сірчистих сполук відбувається шляхом надування невеликої кількості повітря в метантенк. Це приводить до того, що мікроорганізми окислюють газоподібний сірководень (H<sub>2</sub>S) в елементарну сірку, яка, у свою чергу, є цінним мінеральним добривом. Після припинення бродіння воду зливають, осад висушують і гранулюють [8].

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
------------	--------------	-------------	------------	--------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ЕК 19510242	Арк
						24

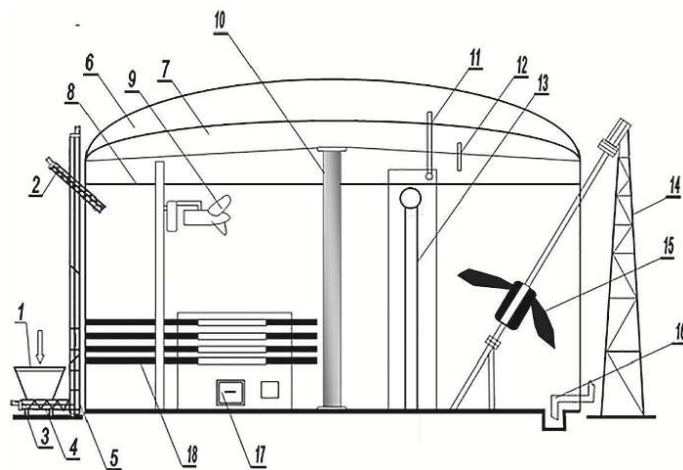


Рисунок 1.4 – Схема рідкофазної біогазової установки: 1 – бункер для сипкого субстрату; 2 – подавальний гвинтовий транспортер; 3 – вагова платформа; 4 – гвинтовий нижній транспортер; 5 – гвинтовий транспортер; 6 – повітряний купол; 7 – біогазовий купол; 8 – рівень наповнення; 9 – вертикальна рухома мішалка; 10 – центральна опора; 11 – труба для подачі повітря; 12 – патрубок для біогазу; 13 – труба для подачі рідкого гною; 14 – опора для мішалки; 15 – похила мішалка; 16 – патрубок для відведення біомаси; 17 – система регулювання температури; 18 – система підігріву біомаси [23]

Установки для продукування біогазу, що оснащені анаеробними реакторами такої конструкції зараз є основним елементом сучасного, безвідходного виробництва в багатьох галузях сільського господарства та харчової промисловості.

Твердофазне бродіння — комбінація послідовних операцій (рис. 1.5), яке полягає у тому, що субстрат, наприклад, біологічні відходи, гній, шлам, жири або біомаса, надходять у герметично закритий біореактор і, як правило, нагріваються та перемішуються. При цьому внаслідок анаеробних хімічних перетворень утворюється біогаз. Наразі такий біореактор застосовується в основному для комбінованого виробництва електроенергії і тепла в блокових міні-ТЕЦ [23].

Інв.№подл. Підп. і дата Взаєм.інв.№ Інв.№дубл. Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

25

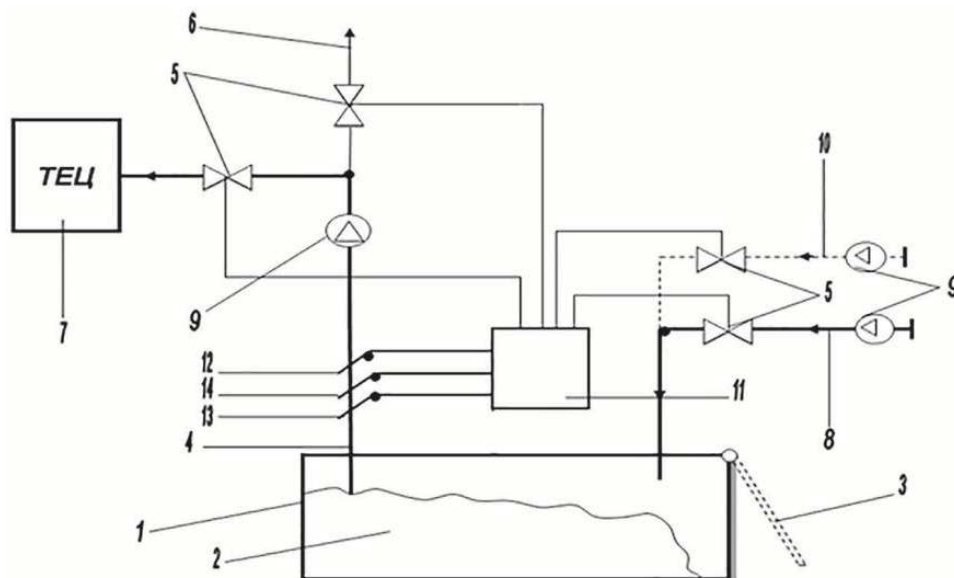


Рисунок 1.5 – Схема твердофазної біогазової установки: 1 – ферментер; 2 – біомаса; 3 – завантажувально – розвантажувальний отвір; 4 – вихід біогазу; 5 – клапан; 6 – газопровід; 7 – блок ТЕЦ; 8 – лінія відпрацьованого газу ТЕЦ; 9 – вентилятор; 10 – лінія свіжого повітря; 11 – пульт управління; 12 – датчик метану; 13 – датчик концентрації вуглекислого газу; 14 – датчик для визначення об’ємної витрати біогазу [23]

Очищена від сірководню ( $H_2S$ ) газова суміш, подається до газопоршневого двигуна, який змушує генератор обертатися. При цьому виробляється електричний струм, який надходить у мережу. Тепло із охолоджувальної системи двигуна і тепло вихідних газів відводяться теплоносієм для подальшої утилізації. Частина цього тепла (15–30%) потрібна для підігріву біомаси та забезпечення оптимальної температури ферментації, тому що бактеріальні штами, що розкладають сировину, найбільш продуктивні в діапазоні температур від  $37^{\circ}C$  (мезофільні) до  $55^{\circ}C$  (термофільні). Надлишок тепла може бути використаний на інші цілі.

Своєю ефективністю відрізняються установки з цілорічним використанням тепла. У багатьох проєктах біогаз після збагачення направляється у газопровід. В наслідок цього, підвищуються шанси для створення біогазових установок в зонах, де немає виробників тепла. Додатково збагачений біогаз може

Підп. і дата

Інв.№дубл.

Взаєм.інв.№

Підп. і дата

Інв.№подл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

26

використовуватися в якості палива для автотранспорту. У субстрату, який залишається після метанової ферментації практично відсутній неприємний запах, тому він може застосовуватися як органічне добриво [23].

Щоб організувати систему отримання біогазу з поетапним використанням камер резервуару, можна використати звичайний резервуар циліндричної форми, попередньо розділивши його поперечною вертикальною перегородкою навпіл (рис. 1.6). Така конструкція буде дешевшою, ніж будівництво двох окремих резервуарів. При даному з'єднанні зменшується значення теплової ізоляції зовнішніх стін резервуара, а в перегородку, яка виготовлена із теплопровідного матеріалу, легко вконтруювати будь-який нагрівальний пристрій, що надасть установці конструктивних переваг [6].

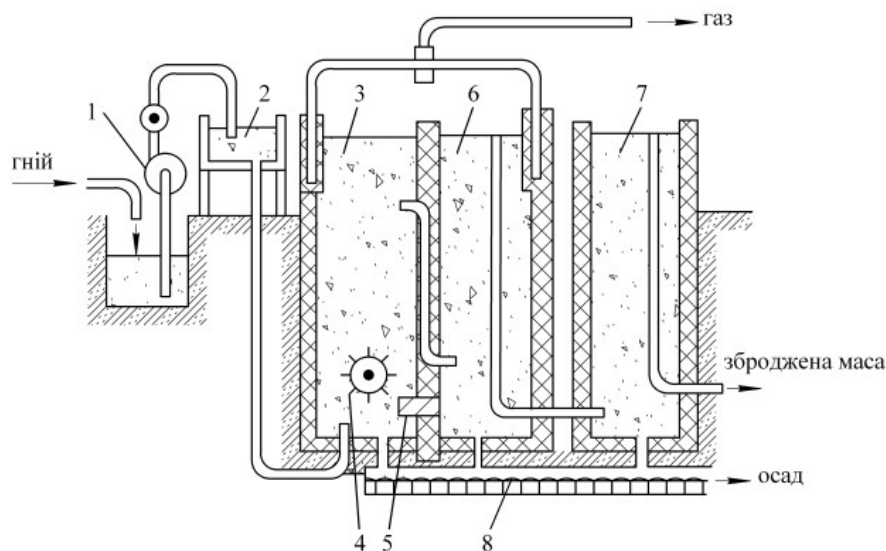


Рисунок 1.6 – Двокамерна біогазова установка проточного типу:

1 – насос; 2 – приймальна камера; 3 – бродильна камера; 4 – пристрій для перемішування; 5 – підігрівач біомаси; 6 – камера остаточного зброджування; 7 – збірник зброженої маси; 8 – шнек [6]

У резервуарі, що розташований горизонтально, біомаса перемішується в поздовжньому напрямі. Для малих установок використовуються циліндричні реактори, виготовлені із сталі чи склопластика. Бетонні горизонтальні

Підп. і дата
Інв. № доудл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № доудл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

27

резервуари великого об'єму мають форму паралелепіпеда. Через нахил даних резервуарів полегшується відтік збродженої маси до вивантажувального отвору. Така конструкція зручна для розміщення простого перемішувального механізму.

Зараз, у країнах Південно-Східної Азії значного поширення набули еластичні реактори (рис. 1.7) [6].

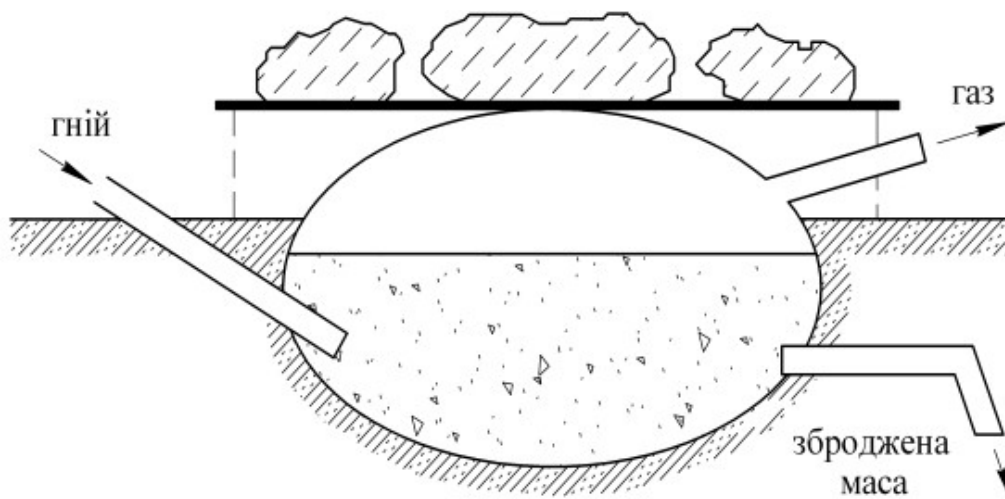


Рисунок 1.7 – Еластичний біогазовий реактор [6]

Реактори (ємності) такої конструкції виготовлені із міцної прогумованої тканини або синтетичної плівки. Для функціонування біогазових реакторів такого типу, їх необхідно заглиблювати в ґрунт, або розміщувати всередині досить міцного огородження [6].

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

EK 19510242

## РОЗДІЛ 2 ОНТОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ ТА МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ БІОПРОЦЕСІВ РЕЦИКЛІНГУ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

У цій роботі було використано для дослідження біохімічних перетворень та моделювання анаеробної ферментації органічних відходів бази даних типу KEGG database, VacDive and EAWAG-BBD.

### 2.1 Використання біоінформаційних електронних баз даних: KEGG database, VacDive та EAWAG-BBD

KEGG PATHWAY - одна з найбільших і найвідоміших баз по генним мережам, метаболічним і сигнальним шляхам. У 2017 р KEGG PATHWAY містила створені експертами вручну графічні уявлення і текстові описи 496 метаболічних або сигнальних шляхів, схем регуляції біологічних процесів, захворювань, класифікацій лікарських речовин. Кожна діаграма представляє узагальнені дані по багатьом видам організмів. Спеціальна опція інтерфейсу бази дозволяє налаштувати діаграму на конкретний вид організму, причому кількість видів залежить від того, наскільки універсальний біологічний процес відображений на діаграмі.

Інформацію про кожену діаграму бази KEGG PATHWAY можна скачати в графічному вигляді і у вигляді текстового опису (включаючи список ідентифікаторів генів). Є програмний інтерфейс KEGG REST API, що дозволяє формувати і виконувати запити до всієї інформації, що міститься в базі KEGG.

РЕАКЦІЯ KEGG є базою хімічних реакцій, переважно ферментативних, що містять всі реакції, що виникають в картах метаболізму KEGG та додаткових реакцій, які з'являються лише в номенклатурі ферментів. Кожна реакція ідентифікується за номером R, наприклад R01143 для кисневої оксидоредуктази (гідроксилування) [24].

Слідуючи довідковим шляхам, можлива робота з діаграмами. Відповідно

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
------------	--------------	-------------	------------	--------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

29

було здійснено пошук у системі та визначено шляхи метаболізму метану в процесі анаеробної ферментації, що наведено на рисунку 2.1.

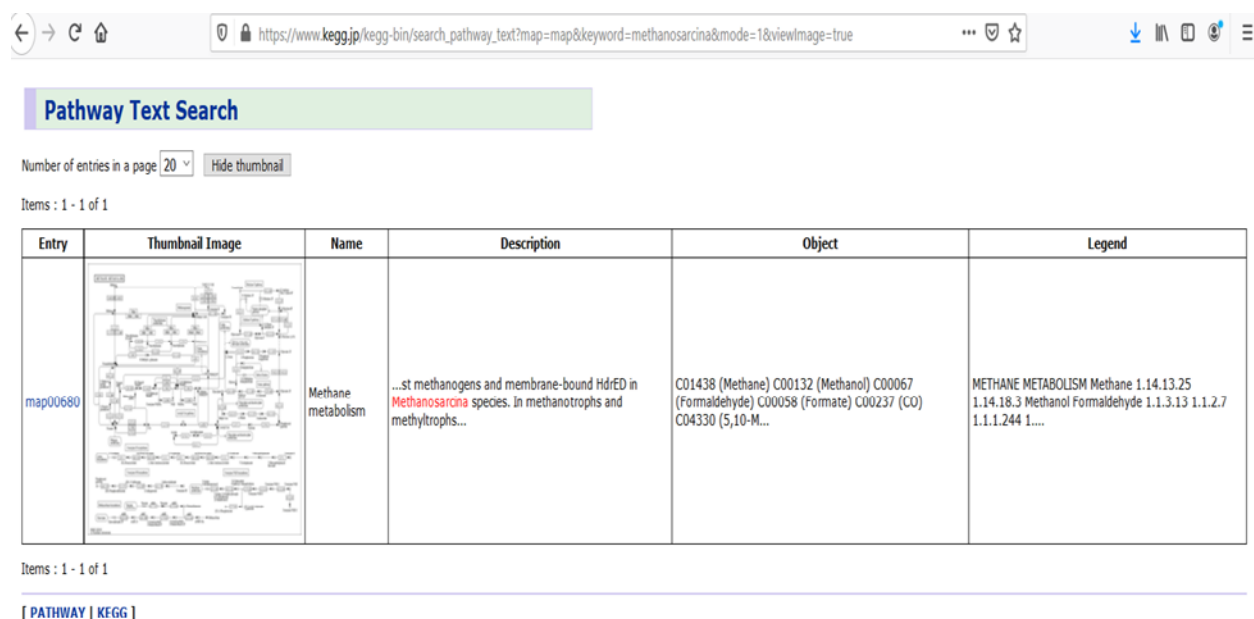


Рисунок 2.1 – Пошук доміантних видів метаногенів на інтерактивній карті метаболічного продукування метану [24]

Метан генерується біологічно метаногеними бактеріями - основною ланкою архейського царства, в основному за рахунок споживання ацетатів і зниження вмісту вуглекислого газу. Останній шлях містить нові коферменти і біохімічні реакції, які раніше не спостерігалися у інших організмів. Метаногенез є частиною метаболічного циклу C1.

Нижче представлена текстова карта шляхів метаногенеза (рис. 2.2). Дається організм, який може ініціювати цей шлях, але інші організми також можуть здійснювати більш пізні етапи. Для отримання додаткової інформації про з'єднання або реакціях перейдіть по посиланнях. Ця карта також доступна в графічному (40k) форматі.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

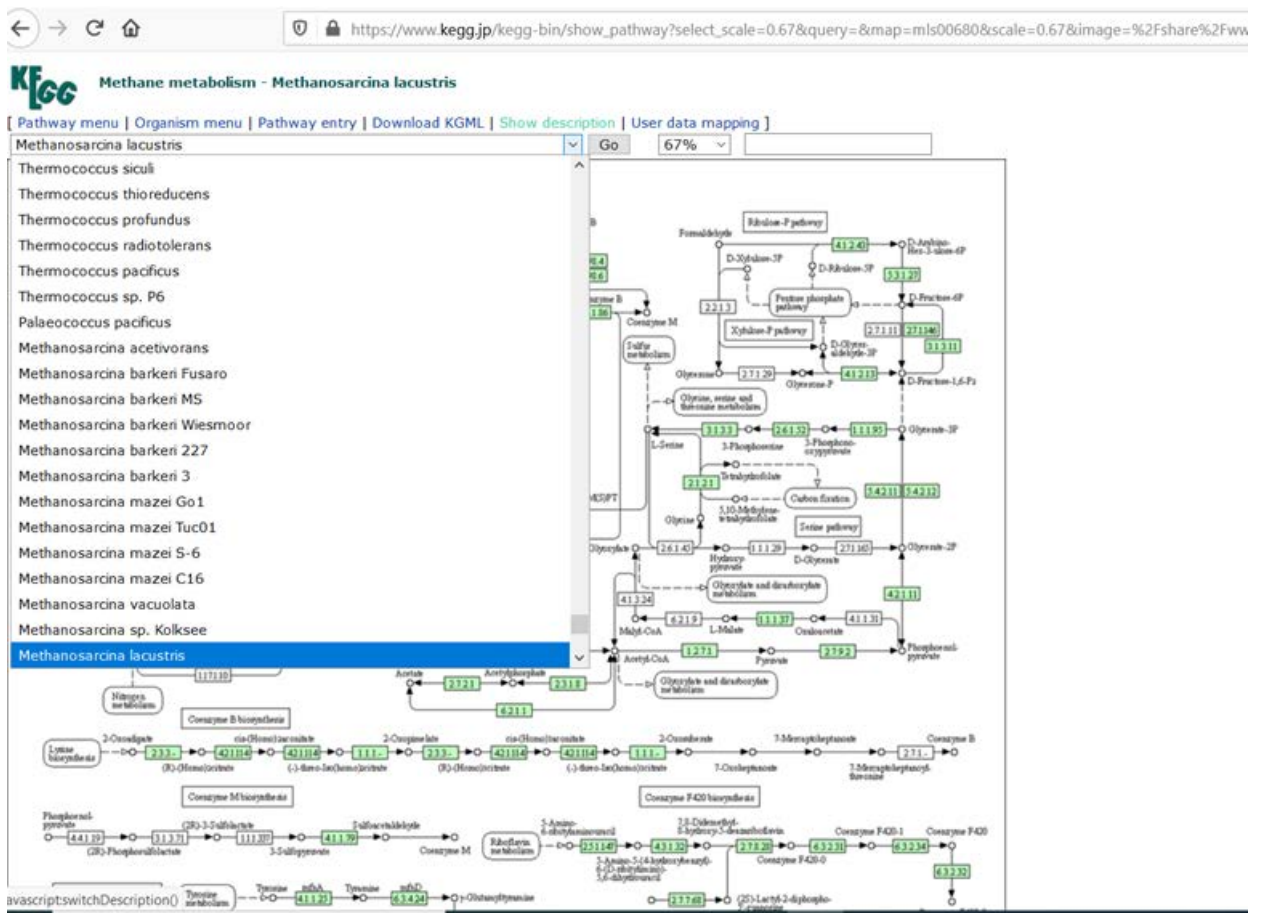


Рисунок 2.2 – Сторінки відображення необхідних родів та видів бактерій, що задіяні в процесі метаногенезу в єдиній спільноті [24]

Метан, як біогенний газ, виробляється біологічно з вуглекислого газу шляхом серії 2-електронного редукування в процесі, відомому як метаногенез. За оцінками, щорічно у всьому світі метаногенів бактерії, або метаногени, виробляють  $10^{15}$  грам метану. У деяких середовищах, наприклад, в озерах, було помічено, що 90% біогенного метану окислюється до потрапляння в атмосферу. В аеробних середовищах, наприклад, у верхніх районах озер, метан біологічно окислюється в результаті серії 2-електронних реакцій окислення, відомих під загальною назвою "метанотрофний метаболізм" або "метанотрофи". Екологічний зв'язок метаногенеза і метанотрофії призводить до великого обороту сполук  $C_1$  в глобальному циклі ([C<sub>1</sub> Metabolic Cycle](#)). Фрагменти  $C_1$  з багатьох джерел метаболізуються розрізненими бактеріями і в кінцевому підсумку потрапляють в глобальний цикл  $C_1$ . Шляхи EAWAG-BBD часто

Підп. і дата

Взаєм.інв.№

Взаєм.інв.№

Взаєм.інв.№

Арк

EK 19510242

31

Вил Арк № докум. Підп. Дата



призводять до утворення з'єднань C<sub>1</sub>. Посилання на багато з них наведені в нижній частині сторінок про з'єднання C<sub>1</sub> [24].

**Біоінформаційна електронна база BacDive** являє собою набір інформації, пов'язаної з організмом, що охоплює різні аспекти біорізноманіття бактерій і археї. Відповідно за видами, що задіяні на різних етапах анаеробного збродження можна знайти необхідну інформацію щодо їх оптимальних умов культивування в технологічних процесах (рис. 2.3).

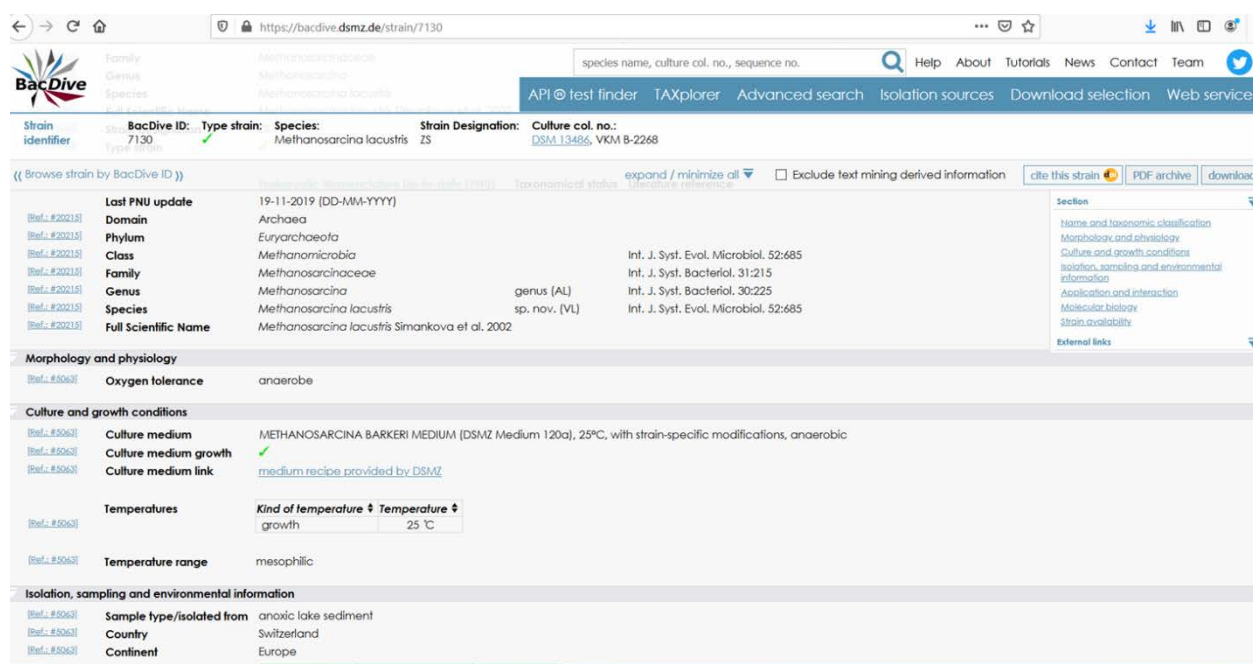


Рисунок 2.3 – Результати пошуку за запитом «*Methanosarcina lacustris*»

Також було здійснено аналіз поживних середовищ з варіацією мікроелементного складу. Все це можна здійснити у базі BacDive.

Через портал веб-сервісів можна отримати доступ не лише до BacDive, а й до списку довідників таксонів. Також визначити місця відбору інокулятів та проаналізувати їх адаптивну здатність до зміни умов середовища.

**Використання біоінформаційної електронної бази EAWAG-BBD.** Розглянуті реакції вивчаються з метою базового розуміння природи, біокаталізу, що веде до хімічного виробництва, та біологічної деградації забруднювачів навколишнього середовища. Індивідуальні реакції та метаболічні шляхи

Інв.№подл. Підп. і дата Взаєм.інв.№ Інв.№дубл. Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

представлені інформацією про вихідні та проміжні хімічні сполуки, організми, які перетворюють сполуки, ферменти та гени [25]. Слідуючи довідковим шляхам, можлива робота з картами. На рис. 2.4 представлено карту метаногенезу.

Methane is generated biologically by methanogenic bacteria, a major division of the Archaea kingdom, largely from acetate dissimilation and carbon dioxide reduction. The latter pathway, as shown below, contains novel coenzymes and biochemical reactions not found in other organisms. Methanogenesis is part of the [C<sub>1</sub> Metabolic Cycle](#).

The following is a text format Methanogenesis pathway map. An organism which can initiate the pathway is given, but other organisms may also carry out later steps. Follow the links for more information on compounds or reactions. This map is also available

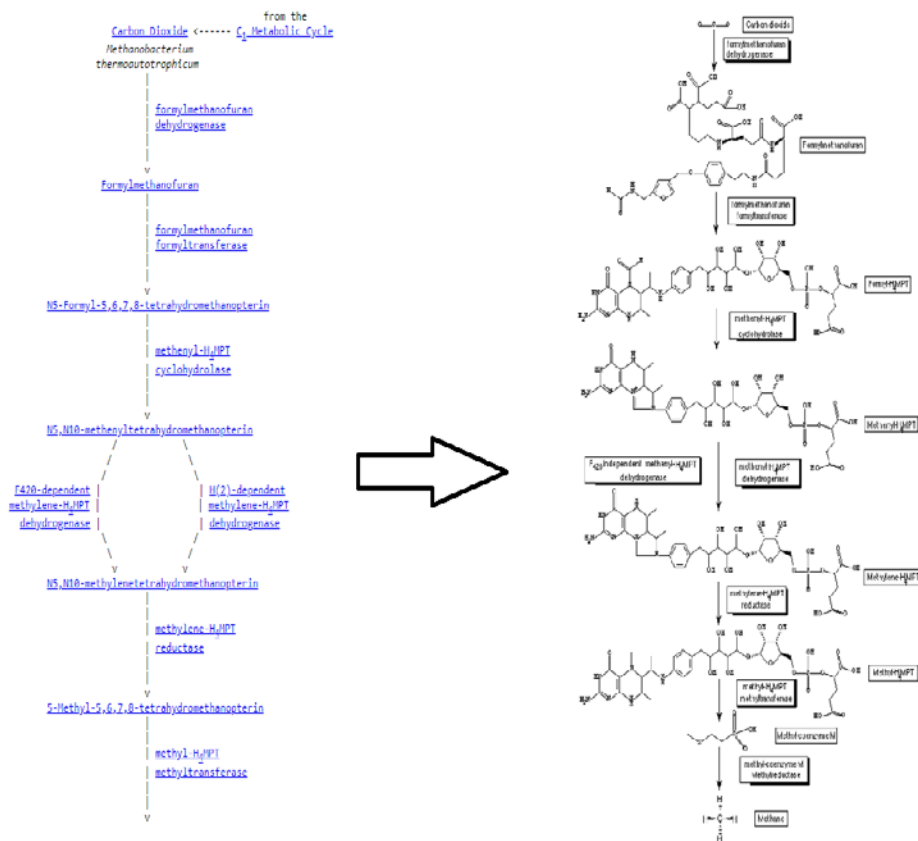


Рисунок 2.4 – Частина карти шляху метаногенезу

Всі карти інтерактивні та можна кожну залучену та отриману в процесі метаболізму бактерій речовину розглянути окремо для знаходження оптимальних шляхів її продукування тощо.

Підп. і дата

Інв.№дубл.

Взаєм.інв.№

Підп. і дата

Інв.№покл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

33

## 2.2 Аналітичні інструменти наукометричної бази даних Scopus в аналізі тенденцій розвитку біоенергетичних технологій анаеробної ферментації

Для оптимізації проведення аналітичних досліджень платформа БД Scopus має набір різноманітних онлайн - інструментів, за допомогою яких можна здійснити і аналіз публікаційної активності в галузі використання анаеробної ферментації задля отримання біопродуктів.

Слідуючи довідковим шляхам, можлива робота з діаграмами. Відповідно було здійснено аналіз знайдених публікацій за такими категоріями:

- кількість опублікованих праць по рокам (рис. 2.5);
- розподіл публікацій по виданням, які індексуються базою (рис. 2.6);
- кількість тематичних публікацій серед авторів та організацій (рис. 2.7, рис. 2.8);
- кількісний розподіл опублікованих документів за територіальним принципом (рис. 2.9);
- порівняння установ, які надають фінансування для досліджень (рис. 2.10).
- розподіл документів за типами (рис. 2.11) та галуззю знань, до якого відноситься текст (рис. 2.12);

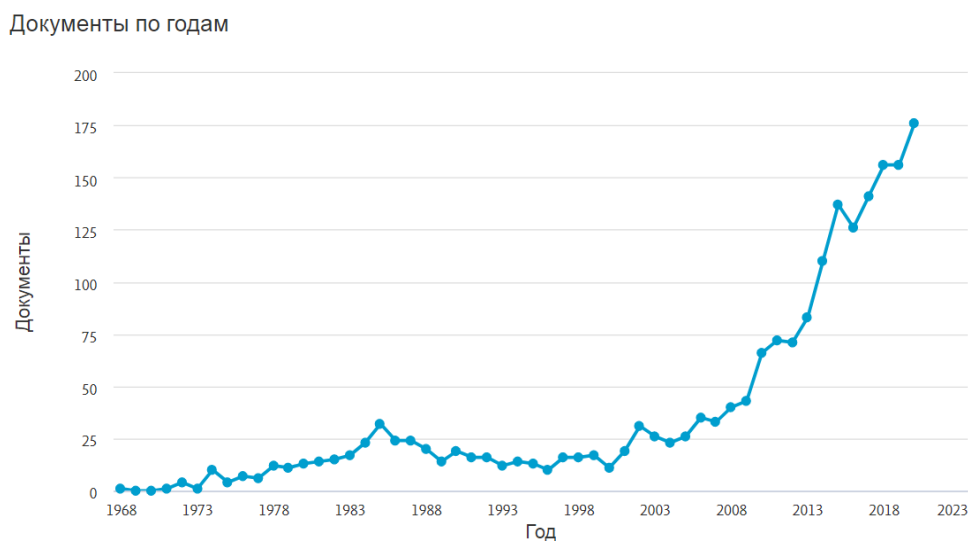


Рисунок 2.5 - Кількість опублікованих праць по рокам

Підп. і дата	Інв.№дубл.	Підп. і дата
Взаєм.інв.№	Взаєм.інв.№	Взаєм.інв.№
Підп. і дата	Підп. і дата	Підп. і дата
Інв.№подл.	Інв.№подл.	Інв.№подл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

34

### Документы за год по источникам

Сравнить количества документов максимум по 10 источникам.

Сравнить источники и просмотреть данные по CiteScore, SJR и SNIP

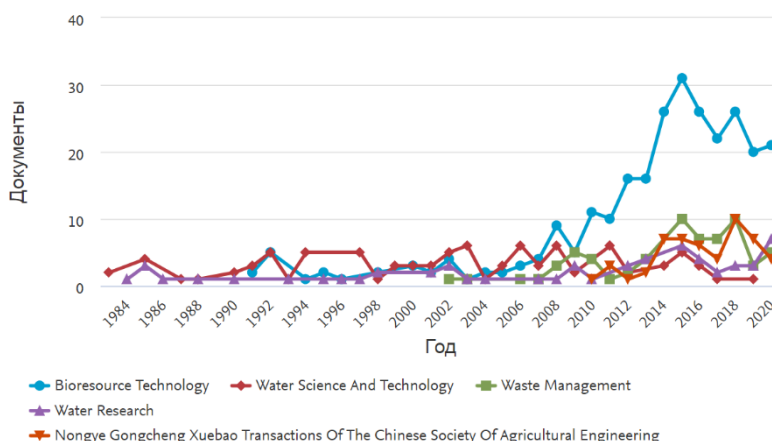


Рисунок 2.6 – Розподіл публікацій по виданням, які індексуються базою

### Документы по авторам

Сравнить количества документов максимум по 15 авторам.

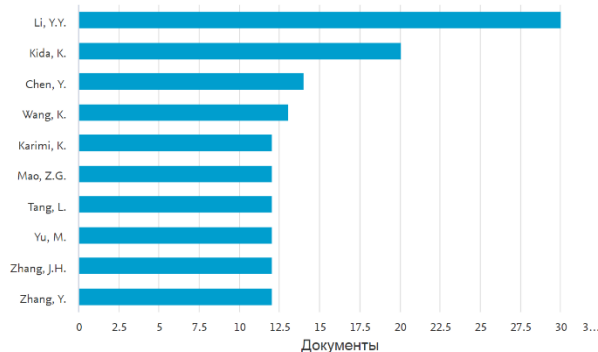


Рисунок 2.7 – Кількість тематичних публікацій серед авторів

### Документы по организациям

Сравнить количества документов максимум по 15 организациям.

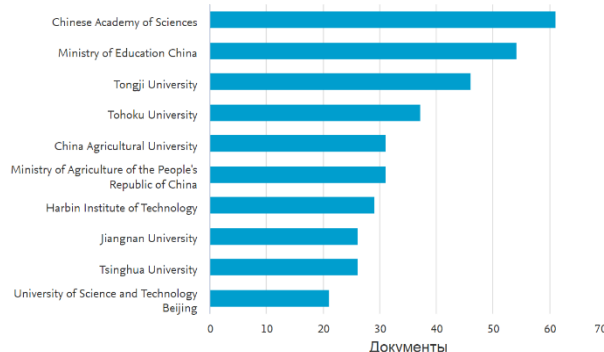


Рисунок 2.8 – Кількість тематичних публікацій серед організацій

### Документы по странам или территориям

Сравнить количества документов максимум по 15 странам/территориям.



Рисунок 2.9 – Розподіл опублікованих документів за територіальним принципом

### Документы по финансирующему спонсору

Сравнить количество документов максимум по 15 финансирующим спонсорам.

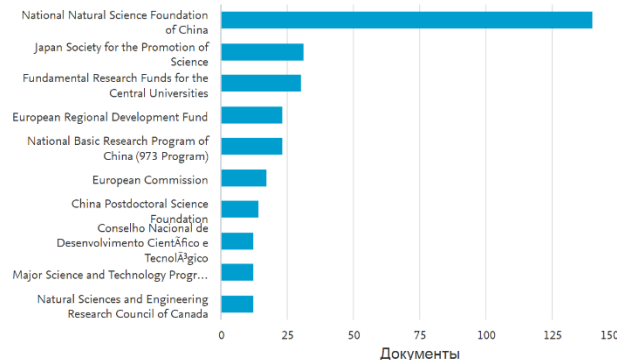


Рисунок 2.10 – Порівняння установ, які надають фінансування для досліджень

Підп. і дата

Інв.№дубл.

Взаєм.інв.№

Підп. і дата

Інв.№подл.

Вил.	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
------	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

35

Документи по типу

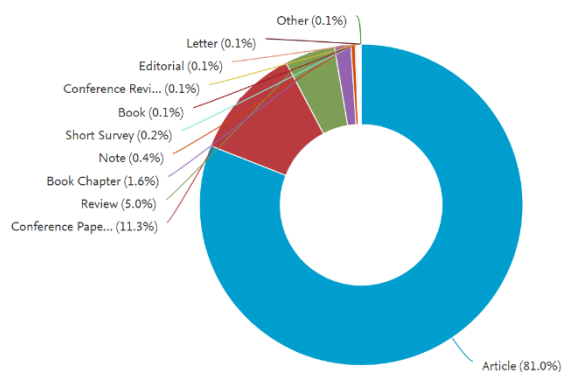


Рисунок 2.11 – Розподіл документів за типами

Документи по отрасли знаний

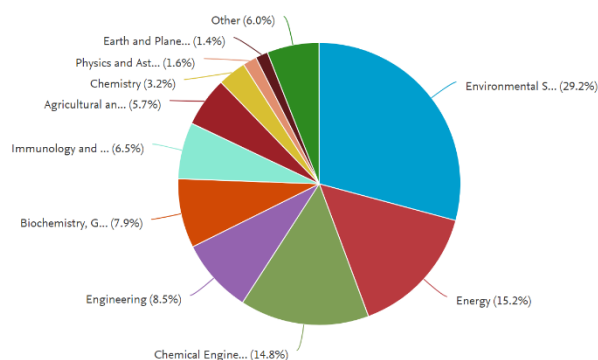


Рисунок 2.12 – Розподіл за галуззю знань, до якого відноситься текст

Так, можна зробити висновок, що активно дослідження процесів анаеробної ферментації задля отримання біопродуктів, які можна залучати у сферу відновних джерел енергії, розпочалися з настанням 2000х років. Тоді гостро постала проблема глобального потепління та виникли питання пошуку альтернативного палива для зниження викидів парникових газів. І до цього часу розвиток досліджень стабілізувався на досить високому рівні.

Найбільше досліджень у даній галузі проводяться науковцями з китайських наукових академій. Відповідно найбільше фінансування для здійснення досліджень направляються з фондів Китаю. Також, лідерські позиції тримають фахівці зі Сполучених штатів Америки, Японії, Індії та Германії.

Варто зауважити, що за типами документів переважають статті, які відносяться до таких галузей знань як природничі науки та інженерія, в т.ч. хімічна, а значить що більшість з публікацій спрямовані на поліпшення екологічної ситуації шляхом комплексного вирішення одразу кількох проблем – утилізації органічних відходів та отримання альтернативних джерел палива з біомаси.

Підп. і дата
Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дата
Інв.№подл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

36

### 2.3 Застосування методів візуалізації за допомогою VOSviewer програми для побудови графів мережевого аналізу та тенденцій у сфері дослідження

Для проведення аналізів та тенденцій у сферах дослідження важливою є візуалізації отриманих даних. Для цього може бути використана програма VOSviewer, розроблена співробітниками Центру досліджень науки і технологій (CWTS) Лейденського університету (<https://www.cwts.nl>). Програма дозволяє працювати з даними з різних джерел (WoS, Scopus, Dimensions, CrossRef, Medline), регулярно оновлюється, поширюється безкоштовно і не вимагає інсталяції.

Функціональність VOSviewer можна узагальнити наступним чином:

1. Створення карт на основі мережевих даних. Карту можна створити на основі вже доступної мережі, але також можливо спочатку побудувати мережу. VOSviewer можна використовувати для побудови мереж наукових публікацій, наукових журналів, дослідників, дослідницьких організацій, країн, ключових слів або термінів. Елементи в цих мережах можуть бути пов'язані за допомогою співавторства, спільності, цитування, бібліографічного зв'язку або посилань для спільного цитування. Для побудови мережі файли бібліографічних баз даних (тобто файли Web of Science, Scopus, Dimensions та PubMed) та файли менеджера посилань (тобто файли RIS, EndNote та RefWorks) можуть бути надані як вхідні дані для VOSviewer.

2. Візуалізація та вивчення карт. VOSviewer забезпечує три візуалізації карти: візуалізацію мережі, візуалізацію накладання та візуалізацію щільності. Функція масштабування та прокрутки дозволяє детально вивчити карту, що дуже важливо при роботі з великими картами, що містять тисячі елементів [26].

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
------------	--------------	-------------	------------	--------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

37

## РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ АНАЕРОБНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ З ОТРИМАННЯМ БІОВОДНЮ ТА ІНШИХ БІОПРОДУКТІВ

### 3.1 Візуалізація трендів та мережевий аналіз у сфері досліджень темної ферментації відходів за допомогою VOSviewer програми

Використовуючи VOSviewer було створено карти візуалізації основних досліджень за тематиками анаеробного збродження відходів задля отримання біометану (рис. 3.1) та, окремо, процесів темної ферментації задля отримання біоводню (рис. 3.2).

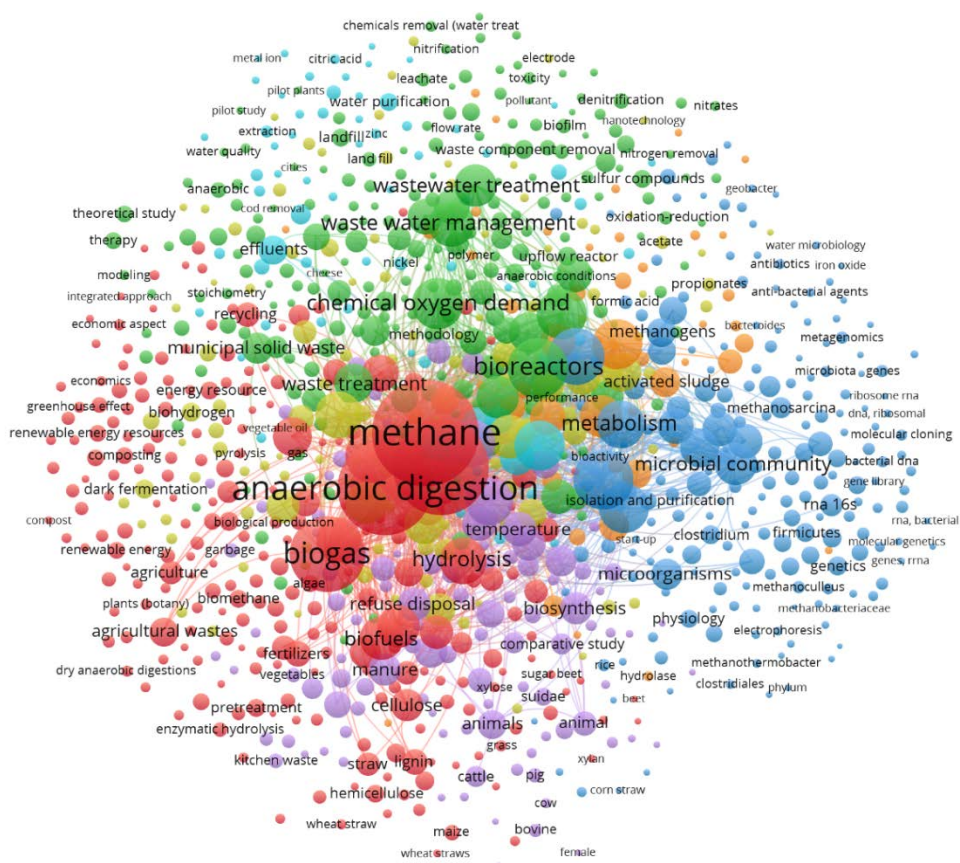


Рисунок 3.1 – Загальна мережева візуалізація досліджень отримання біометану: 7 кластерів, 172174 links, 614735 total link strength (з використанням БД Scopus)

Виділяються 7 основних кластерів:

1 кластер (червоний) - це процеси отримання біогазу (що складається в основному з метану) в результаті ферментації біомаси. Це у свою чергу напряму

Підп. і дата
Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дата
Інв.№подл.

вирішує проблеми безпечної утилізації органічної фракції відходів, в тому числі і відходів сільського господарства. При цьому біогаз можна вважати безпечним альтернативним паливом, яке здатне повністю замінити викопне;

2 кластер (зелений) - це використання біореакторів задля збродження органіки. Процес анаеробної ферментації біомаси протікає без надходження кисню в спеціальних конструкціях-метантенках, в яких забезпечується максимальне виділення  $CH_4$ . Дуже важливим для процесу метанового бродіння є забезпечення необхідних технологічних умов задля життєдіяльності бактерій;

3 кластер (синій) - це дія мікроорганізмів при розкладанні органічних речовин на метан і вуглекислий газ. Відомо, що у процесі анаеробної ферментації задіяні 3 основні групи мікроорганізмів: ферментативні бактерії – беруть участь у гідролізі первинного субстрату, облігатні ацетогенні бактерії - продукують водень і оцтову кислоту з утворених продуктів життєдіяльності першої групи бактерій, метаногенні бактерії - споживаючи утворений іншими бактеріями водень, відновлюють  $CO_2$  до  $CH_4$  і розщеплюють оцтову кислоту до  $CO_2$  до  $CH_4$ .

4 кластер (жовтий) пов'язаний з біохімічними основами процесу анаеробного бродіння. Вивчаються основні етапи метаногенезу: розчинення і гідроліз органічних сполук, ацидогенез і безпосередньо метаногенез;

5 кластер (фіолетовий) відноситься до вивчення оптимальних умов, необхідних для здійснення перетворення органіки на корисні біопродукти. Для найбільшої ефективності необхідно забезпечувати відповідні умови температури, рН з урахуванням наявності речовин інгібіторів, особливостей субстрату, часу бродіння та ін..

6 кластер (блакитний) пов'язаний з встановленням факторів, які здатні підвищити інтенсивність процесів метаноутворення або інгібувати їх.

7 кластер (помаранчевий) пов'язує між собою публікації щодо дослідження анаеробної ферментації стічних вод задля їх очистки. Даний метод вважається доцільним для очищення концентрованих стічних вод від харчових виробництв.

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

**EK 19510242**

Арк

39



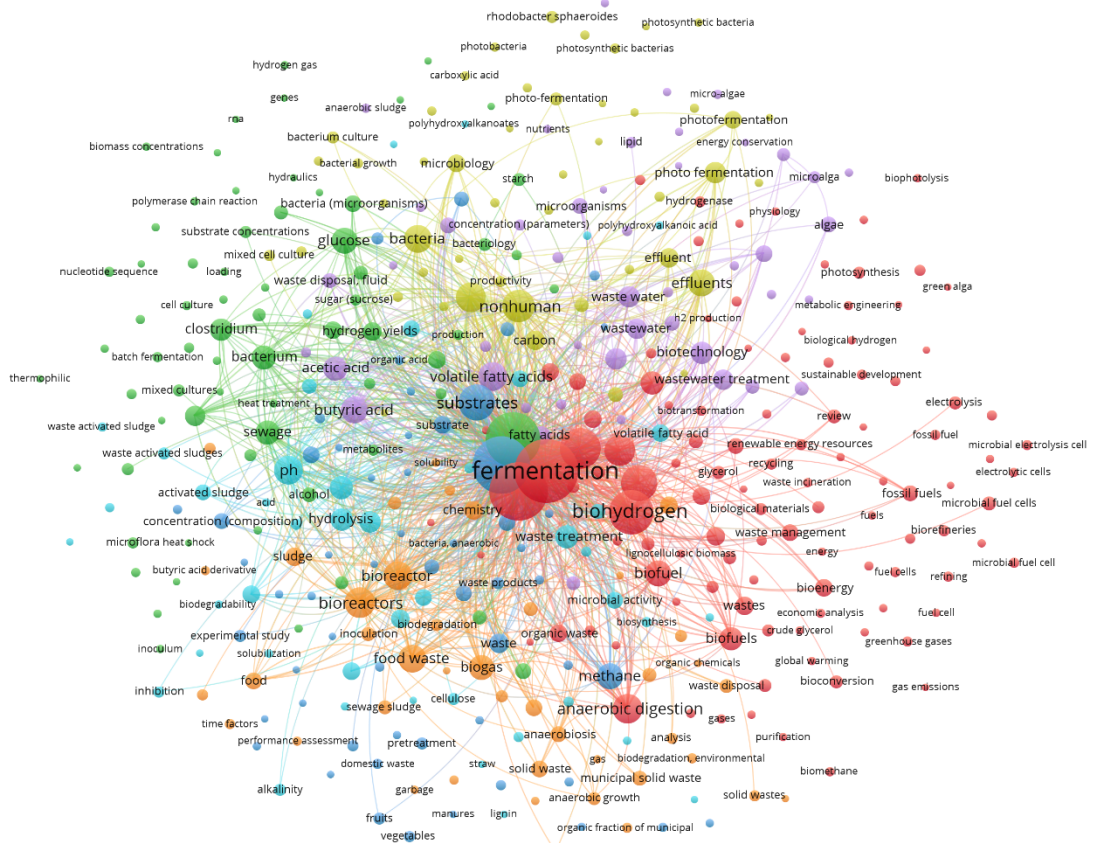


Рисунок 3.2 – Загальна мережева візуалізація досліджень отримання біоводню: 7 кластерів, 37886 links, 120869 total link strength (з використанням БД Scopus)

На даній карті також виділяється 7 кластерів. Розглянемо їх детальніше.

1 кластер (червоний) - об'єднує вивчення процесів темної ферментації сільськогосподарських відходів задля отримання біоводню як джерела альтернативної енергії. Розроблення дешевих технологій отримання водню забезпечить не лише збереження природних ресурсів, а й стрімке економічне зростання держави.

2 кластер (зелений) – розглядає основні штами мікроорганізмів та їх об'єднання, які при протіканні ацетогенної стадії продукують водень; вивчаються їх основні метаболічні шляхи. Важливо, щоб у біореакторі були дотримані всі вимоги, необхідні для життєдіяльності анаеробів та неперервного протікання процесу ферментації (вдень та вночі).

3 кластер (синій) – це детальні процеси утилізації відходів харчової промисловості (зокрема овочі і фрукти) методом анаеробної ферментації.

Досліджуються особливості попередньої підготовки субстрату та її впливу на вихід біосировинних продуктів.

4 кластер (жовтий) – це ферментативне перетворення органічного субстрату в біоводень, що здійснюється групою бактерій за допомогою мультиферментативних систем. Для порівняння розглядаються процеси фотоферментації - світлозалежного виділення водню, при якому мікроорганізми конвертують світлову енергію в енергію хімічних зв'язків молекул водню. Виділяються і найбільш придатні для даних процесів фотобактерії.

5 кластер (фіолетовий) – відноситься до вивчення анаеробного ферментування надлишкового активного мулу очисних споруд каналізації. Визначаються основні хімічні сполуки, що є метаболітами. Окрім цього проводяться дослідження щодо застосування мікроводоростей, які каталізують утворення водню з води за рахунок енергії світла.

6 кластер (блакитний) - пов'язаний з біохімічними основами темної ферментації, в процесі якої енергія хімічних зв'язків молекул субстрату перетворюється в енергію хімічних зв'язків водню.

7 кластер (помаранчевий) - пов'язує між собою публікації щодо вивчення отримання біоводню, як одного з різновидів біогазу, що дозволить сформувати альтернативний газопаливний ресурс. Тому подальші дослідження повинні бути зосереджені для пошуку нових видів сировини і досконаліх технологій її переробки в біогаз та максимально повного корисного використання енергії біогазу.

Усі кластери об'єднані спільними тематичними та регіональними дослідженнями.

**Накладна візуалізація (Overlay visualization)**, що показана на рисунку 3.3 та рис. 3.4, була обрана в якості більш ефективного інструменту для перевірки останніх тенденцій в дослідженнях в часовому масштабі. Розмір кіл відповідає переважанню термінів при публікації досліджень в цих областях. Розподіл кольорів залежить від року публікації (середнє для кластера), при цьому останні

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

- жовтого кольору.

Таким чином, найбільш інтенсивне використання термінології для досліджуваних кластерів в області отримання біометану відбулося в 2016 році.

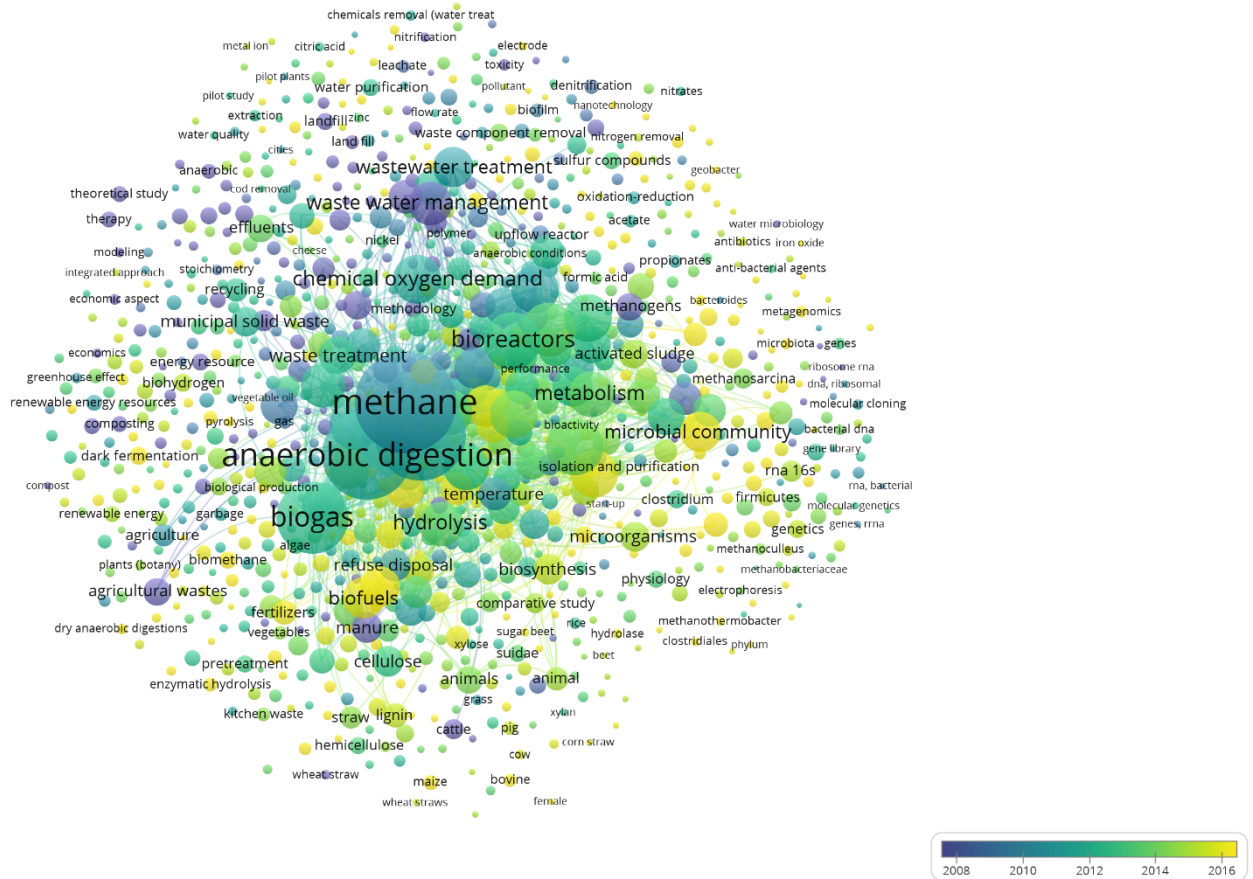


Рисунок 3.3 – Накладна візуалізація досліджень отримання біометану, де одиниця виміру є час з моменту публікації (з використанням БД Scopus)

Що стосується досліджуваних кластерів в області отримання біоводню, то часові рамки дещо відрізняються. Так, найбільша активність спостерігається з 2013 року, а найінтенсивніше використання термінології відбулося в період з 2015 по 2016 роки.

Підп. і дата	
Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Інв.№подл.	

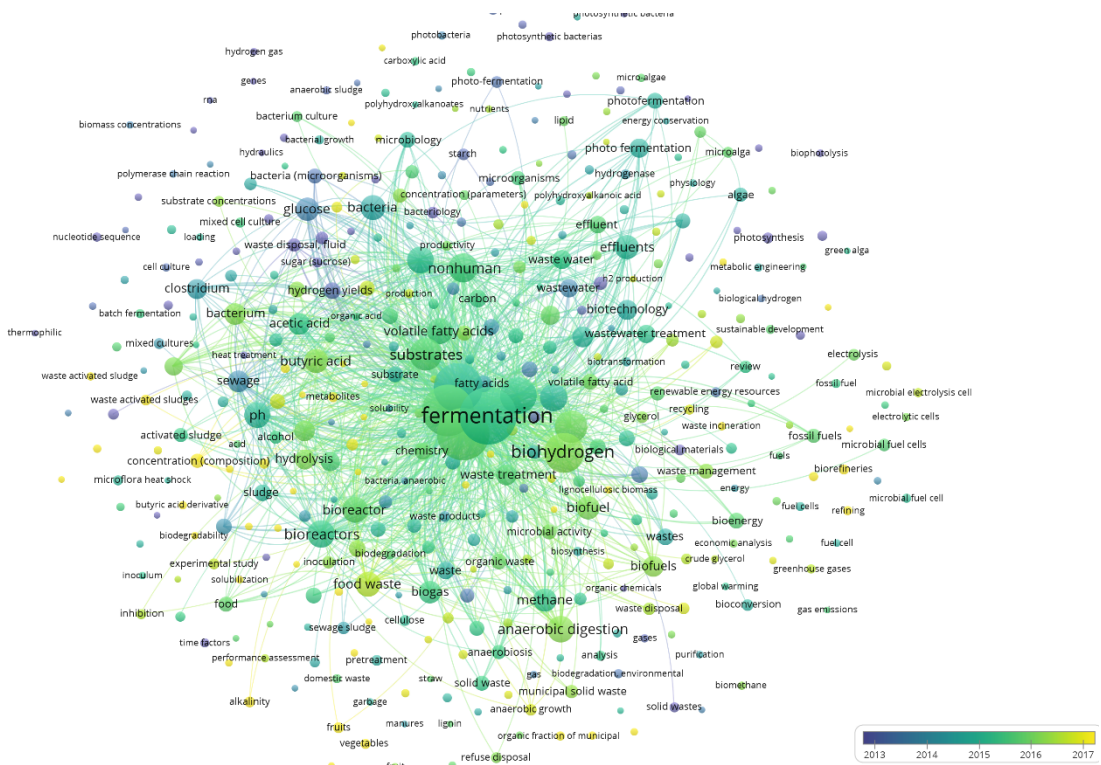


Рисунок 3.4 – Накладна візуалізація досліджень отримання біоводню, де одиниця виміру є час з моменту публікації (з використанням БД Scopus)

На сьогоднішній день існує загальна тенденція вивчення процесів утилізації органіки задля отримання біопродуктів.

Так, Safa Senan Mahmod та ін. (2020) досліджували двоступеневе анаеробне перетравлення стоків з виробництва пальмової олії. Ними був проведений дослід з деградації збагачених кислотою стоків після стадії темної ферментації для отримання біометану у реакторі безперервного перемішування [27].

Американський дослідник (John G. Ingersoll) у своїй праці (2020) пропонує новий процес, за допомогою якого деревні відходи ферментують в анаеробних умовах спільно з гноєм з високим вмістом азоту для отримання біометану разом з азотними, фосфорними і калійними біодобривами. Більш того, діоксид вуглецю, що вловлюється при підвищенні якості виробленого біогазу, може бути перетворений у вторинний біометан за допомогою ферментації воднем, отриманим в результаті електролізу води, що приводиться в дію вітряної енергією [28].

Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата
Інв. № подл.			

У роботі Gaweł Sołowski (2020) представлені результати теоретичного потенціалу виходу метану та водню з лігноцелюлозних відходів з обов'язковою попередньою обробкою сировини. Основною причиною застосування попередньої обробки є розкладання (декристалізація) целюлози та геміцелюлози та розщеплення полімерів до мономерів, які можуть легше засвоюватися бактеріями в процесах бродіння. У майбутньому необхідно зосередити увагу на негативних ефектах від обробних розчинів, оскільки можливе гальмування процесу бродіння та не екологічність роботи (наприклад, забруднення навколишнього середовища) [19].

Muratov та ін. (2020) пропонують спосіб переробки органічних відходів в анаеробних умовах з використанням електричної імпульсної обробки органічних відходів перед завантаженням на біогазову установку, але цей напрям має складності в практичній реалізації та потребує подальших досліджень [29].

Righetti зі співавторами (2020) впровадили біопереробну платформу для рециклінгу агровідходів (стоки худоби та силос трави) у реальному середовищі ферми. Прийнята система також була двоступеневим анаеробним процесом, де у першій фазі (бродіння) вироблялись водень та леткі жирні кислоти, а у другій - метан (перетравлення). Їх дослідження успішно продемонструвало можливість отримання біогазу, що складається з водню та метану (10% та 55%, відповідно) та летких жирних кислот за один і той же біопроект [30].

Таким чином, можна зробити висновок, що анаеробна ферментація з фазою темного бродіння є не тільки корисною для процесів безпечної утилізації органічних відходів, але і це найбільш перспективний та доступний шлях генерування біогазу, біоводню та інших продуктів, необхідних для відмови від використання викопних видів палива. Але варто зазначити, що необхідні подальші дослідження цих методів, і їх оптимізація необхідна для обґрунтування економічної ефективності та широкого комерційного застосування.

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<b>EK 19510242</b>	Арк
						44

### 3.2 Вивчення впливу різних концентрацій мінеральних добавок та ко-субстратів на процес двох стадійної анаеробної ферментації з отриманням біоводню та інших біопродуктів

Темнова ферментація виробляє водень з відносно низьким виходом (максимум  $4\text{H}_2$  на глюкозу) з накопиченням метаболітів, таких як леткі жирні кислоти (ЛЖК). З іншого боку, процес темної ферментації як і раніше привабливий через дуже високу продуктивність і просту конструкцію реактора. У зв'язку з цим гібридні системи, які додають другий процес для обробки стоків темної ферментації, є предметом інтересу багатьох досліджень. При додаванні другого процесу гібридні системи можуть мати потенційно привабливий високий вихід водню, вирішуючи при цьому проблему очистки стічних вод при темновій ферментації.

Існує кілька можливих комбінацій гібридної системи [31]:

- 1) темнова ферментація + фотоферментація. ЛЖК, які утворюються при темновій ферментації, є ідеальними субстратами для фотоферментації;
- 2) темнова ферментація + осередок для мікробного електролізу;
- 3) темнова ферментація + безклітинна ферментативна система.
- 4) темнова ферментація + анаеробне збродження у ферментері. ЛЖК в стоках темного бродіння можуть бути субстратами для метаногенів. У цьому процесі може утворюватися суміш водню і метану.

У перших трьох комбінацій є потенціал для досягнення максимального виходу  $12\text{H}_2$  на глюкозу.

Багато бактерій можуть виділяти водень в результаті темного бродіння з використанням органічних сполук:  $[\text{CH}_2\text{O}]_n \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ . Саме ці мікроорганізми можна використовувати для утилізації різних органічних відходів.

Бактерії, що виділяють водень при темновій ферментації, були виявлені серед представників 25% штамів бактерій, представлених в останньому виданні *Bergia Bacteria Identifier*. Серед цих бактерій є відомий вид *Escherichia*

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № покл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

45

*coli*. Фермент гідрогеназа каталізує цей процес в анаеробних умовах. Швидкість утворення водню ферментаційними бактеріями (400-650 мл/год на 1 г сухої біомаси клітин) набагато вищий, ніж у інших мікроорганізмів, наприклад, фотосинтетичних [32]. Етапи процесу показані на рисунку 3.5.

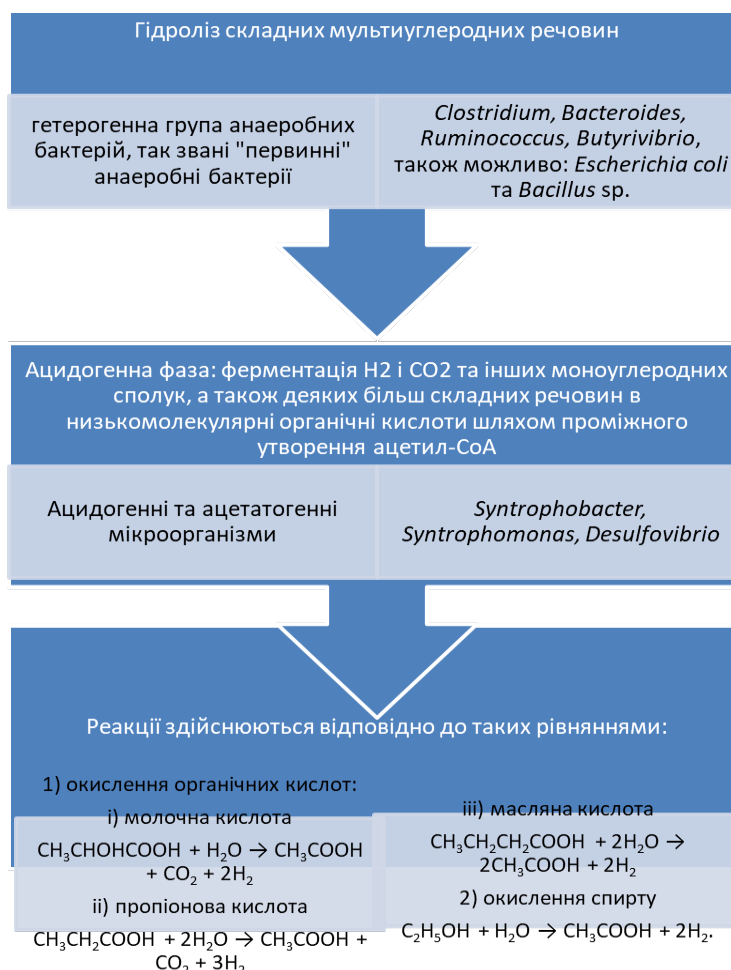


Рисунок 3.5 – Біохімічна реакція темної ферментації

Для інтенсифікації процесу бродіння метану необхідно оптимізувати умови, за яких швидкість ферментативних реакцій була б максимальною.

Ріст і активність метанових бактерій вимагають наявності в сировині органічних та мінеральних поживних речовин. Крім вуглецю та водню, для створення біодобрив необхідна достатня кількість N, S, P, K, Ca, Mg та ряду мікроелементів - Fe, Mn, Mo, Zn та інших [33].

Репродуктивна активність метаноутворюючих бактерій значною мірою

Підп. і дата	
Взаєм. інв. №	
Інв. № дубл.	
Інв. № подл.	

визначається співвідношенням вуглецю та азоту в сировині. Критерієм оптимального співвідношення C: N є вихід біогазу. Якщо співвідношення C: N у посліді надмірне, то брак азоту обмежує процес метанового бродіння, якщо це співвідношення дуже мале, то в метантенку утворюється велика кількість аміаку, і він стає токсичним для бактерій. Співвідношення C/N 10: 1 до 30: 1 вважається сприятливим для розмноження метаноутворюючих бактерій [33].

Орієнтовний вміст азоту і співвідношення вмісту вуглецю і азоту в різних відходах по сухій масі представлені у табл. 3.1 [6].

Таблиця 3.1 – Вміст азоту у різних видах органічних відходів [6]

Вид відходів	Загальний вміст N, %	Співвідношення C/N
Відходи тваринництва:		
Сеча	15-18	0,8
Пташиний послід	6,3	-
Гній овечий	3,8	-
Гній свинячий	3,8	-
Гній кінський	2,3	25
Гній коров'ячий	1,8	18
Відходи рослинництва:		
Солома	1,1	48
Відходи льону	1,0	58
Сира тирса	0,25	208

Цей параметр коригується шляхом додавання до утилізованої біомаси відходів з високим вмістом азоту, таких як курячий гній або свинячий гній. Оптимізація середовища з високим вмістом аміаку досягається додаванням подрібненої біомаси з високим вмістом вуглецю, наприклад соломи.

Варто зазначити, що деякі субстрати містять велику кількість токсинів (наприклад, масляна кислота, вільний аміак, сірководень), які можуть накопичуватися в процесі анаеробного розщеплення і можуть призвести до низького виробництва біогазу або відключення системи. Тому додаткові добавки для стимулювання виробництва біогазу привернули більше уваги. Добавки додаються для поліпшення ефективності процесу ферментації шляхом подачі

Підп. і дата
Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дата
Інв.№подл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

47



дефіцитних поживних речовин або зменшення впливу токсинів у відходах. Загалом, добавки включають мінеральні добавки та біологічні ферменти. Мінеральні добавки також поділяються на макроелементи та мікроелементи. Макроелементи діють як буфер і компенсують основні компоненти для росту мікробів, наприклад, азот і фосфор. Як правило, мікронутрієнти - це добавки для мікроелементів, таких як Fe, Ni і Co [34].

Часто ці елементи подаються з надлишком для інших цілей. Наприклад,  $H_2S$ , який виробляється як побічний продукт під час процесу АФ, може пригнічувати ріст метаногенів. Одним із підходів до контролю токсичності  $H_2S$  є додавання заліза, оскільки воно реагує з  $H_2S$ , утворюючи сольовий осад (тобто FeS). Подібним чином магній може зменшити накопичення аміаку в змішаному розчині завдяки кристалізації амоній-фосфату магнію.

Поєднання мікроелементів може виявляти значні синергетичні ефекти. Збільшені концентрації Ni та Co можуть прискорити початкові експоненціальні показники, збільшити загальний обсяг виробленого метану та збільшити щільність клітин метаногенів. Інші метали, такі як Se, Mo та W, які можуть підвищити ефективність ферментації, потребують концентрації в 10 разів нижчої, ніж Fe, Ni та Co [35].

Побутові органічні відходи, що підлягають анаеробній утилізації, містять велику кількість лігніну, целюлози та ліпідів, які можуть впливати на мікробну активність метаногенів та розпад органічних сполук. Отже, анаеробне розщеплення необхідне для посилення активності метаногену та первинних етапів деградації для виробництва біогазу за допомогою біологічного ферменту, такого як целюлаза, ліпаза та протеаза [34].

Так, Minsoo Kim зі співавторами (2017) оцінили вплив додавання різних добавок, що склалися з  $MgO$ ,  $MgCl_2$ ,  $FeCl_2$  та  $FeCl_3$ , целюлази, на виробництво біогазу із застосуванням змішаних органічних відходів, що складаються з харчових відходів, свинячого гною та активного мулу. Кількість біогазу, виробленого реактором, з дадними  $MgCl_2$ , або  $MgO$ , була на 15%

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

вищою, ніж кількість у контрольному зразку. Реактори, з доданими FeCl<sub>2</sub> або FeCl<sub>3</sub>, також демонстрували вищі значення біохімічного потенціалу метану, ніж контрольні; більший % біогазу був у реакторі з додаванням FeCl<sub>3</sub>. MgO, FeCl<sub>3</sub> і целюлоза застосовувалися у вигляді суміші. Реактори, оброблені комбінованою добавкою, показали більш високий кумулятивний вихід метану, ніж контрольний зразок; значення біохімічного метанового потенціалу та ефективність біодеградації реакторів були вище, ніж при застосуванні комерційних продуктів. Окрім цього аналіз мікробіологічних спільнот показав, що різні добавки можуть сприяти зростанню різних груп мікроорганізмів. Наприклад, такі добавки, як MgO та FeCl<sub>3</sub>, продемонстрували покращену активність бактерій, що продукують водень, таких як *Syntrophomonadaceae* та *Clostridium*, а целюлоза сприяє зростанню *Methanosaeta concilii* [34].

У роботі Xiaofei Lu та співавт. (2018) було досліджено вплив добавки, званої оксидом заліза-цеоліт, на характеристики процесу анаеробного зброджування відходів свиней при мезофільній (35°C), навколишній (25°C) і психрофільній (15°C) температурах (рис. 3.6).

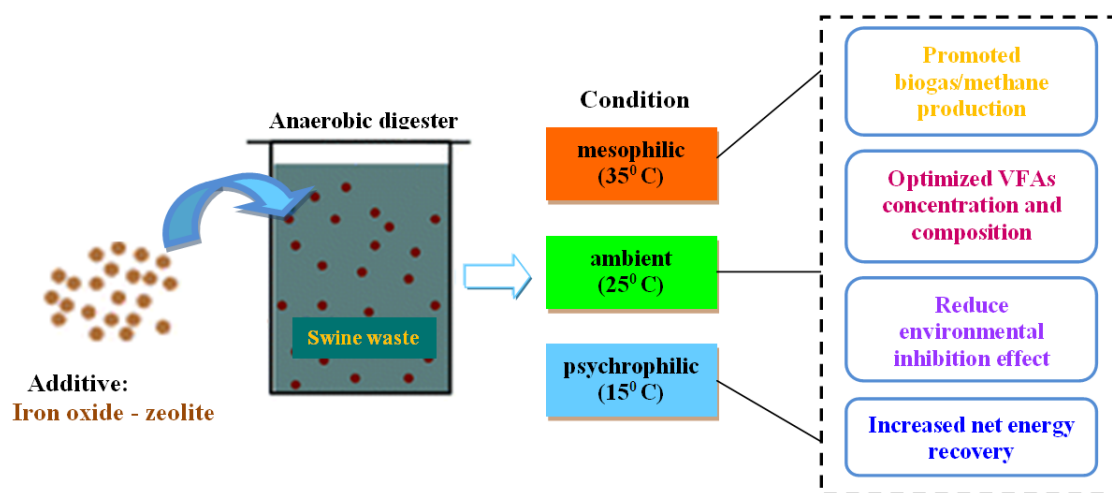


Рисунок 3.6. – Вплив добавки оксид-цеоліт заліза на ефективність процесу анаеробної ферментації [36]

Стимулююча дія добавки сприяла значному збільшенню виходу біогазу та метану (20,90-183,03% і 33,84-221,52% відповідно), вмісту метану (10,73-

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

14,26%), утворенню і утилізації летючих жирних кислот і видаленню органічних речовин (наприклад, 35,79-69,02% видалення). Висока адсорбційна здатність добавки знижує концентрацію аміаку приблизно на 380,35-510,73 мг / л. Підвищена концентрація коензиму F420 вказує на посилення метаногенної активності при всіх трьох температурах [36].

Отже, комбіновані добавки можуть бути використані для стимулювання виробництва біогазу на практиці. Багато досліджень [34, 37, 38] показують, що анаеробне виробництво біогазу можна сприяти просто додаванням субстратних добавок, які можуть зменшити токсичність субстратів. Тому для вдосконалення цих методів слід проводити подальші дослідження, розробляючи комбінації добавок, які допоможуть повністю знищити гальмівний ефект субстрату.

### 3.3 Розроблення інтегрованої моделі біопроектів продукування водню і метаногенерації на стадіях анаеробної ферментації відходів

Розробка енергетично та екологічно вигідних технологій одержання водню та метану є актуальною проблемою сьогодення. Одним зі способів, що задовольняє ці вимоги, є біотехнологічне виробництво, схема якого представлена на рис. 3.7.

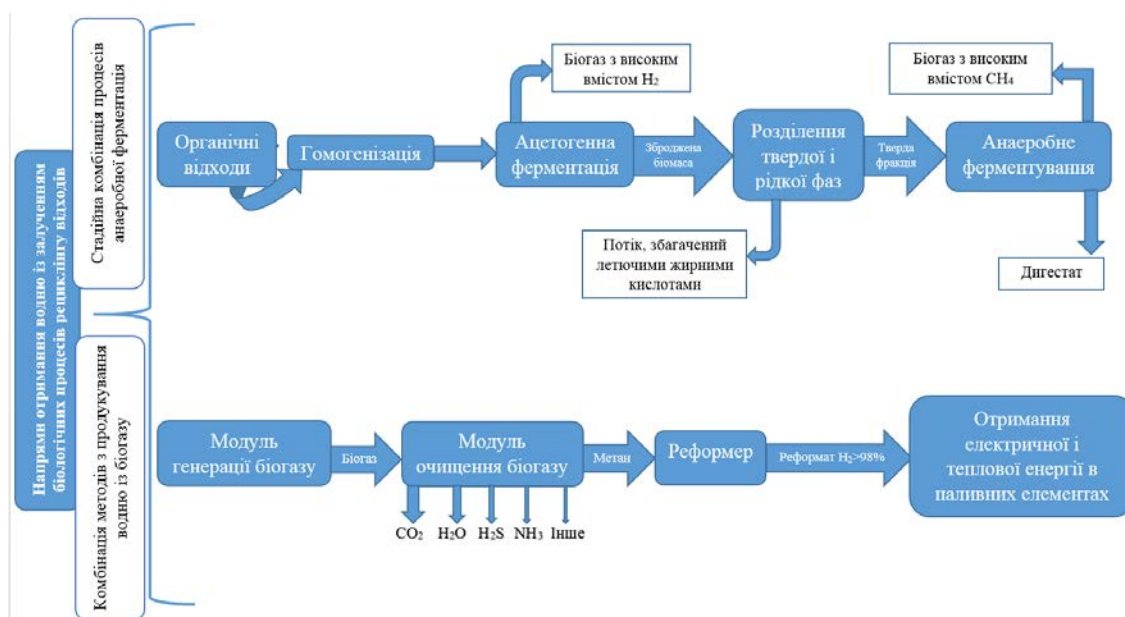


Рисунок 3.7 – Модель комбінації біопроектів виробництва водню та метану

Інв.№поділ.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

*Стадійна комбінація анаеробної ферментації.* На ацетогенній стадії задіяні 2 групи ацетогенних бактерій. Перша утворює ацетат з виділенням водню (ацетогени, які утворюють водень з розчинних продуктів попередньої стадії кислотоутворення). Друга група ацетогенних бактерій приводить до утворення оцтової кислоти шляхом використання водню для відновлення двоокису вуглецю (ацетогени, які використовують водень).

На метаногенній стадії метанові бактерії утворюють метан двома шляхами – розщеплюючи ацетат та відновлюючи вуглекислоту воднем. Першим шляхом утворюється 72 % метану, другим – 28 %.

Трофічні системи при анаеробному зброджуванні характеризуються використанням продуктів обміну одних груп бактеріями інших. Тому необхідно організувати процес послідовного проходження кожного етапу в окремому апараті, або в окремій зоні апарата. Причому умови проходження процесу різні в кожній зоні. Наукова концепція технології фазового розподілення базується на різних вимогах кислотно- та метаноутворюючих мікроорганізмів до умов середовища та різниці їх фізіологічних характеристик.

*Комбінація методів з продукуванням водню із біогазу.* Відповідно до технологічної схеми процесу (рис. 3.7) така комбінація містить першу ланку виробництва біогазу із органічних відходів, подальшу його акумуляцію та очищення до метану із якого у паливному процесорі отримують водень високої чистоти для подачі у паливний елемент, досліди за цим напрямом здійснюються дуже активно [39].

Екологічна безпека при застосуванні біогазу і його висока теплотворна здатність підкріплена простотою технологій отримання, а також значна кількість відходів, які необхідно утилізувати - все це зумовило пріоритетний розвиток біогазової промисловості щодо інших галузей біоенергетики в світі. Проблеми накопичення відходів різних типів полягають у вимозі їх переробки за короткий час, досягаючи при цьому найменших економічних та енергетичних затрат з мінімальним екологічним впливом [40] (рис. 3.8).

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

**EK 19510242**

Арк

51

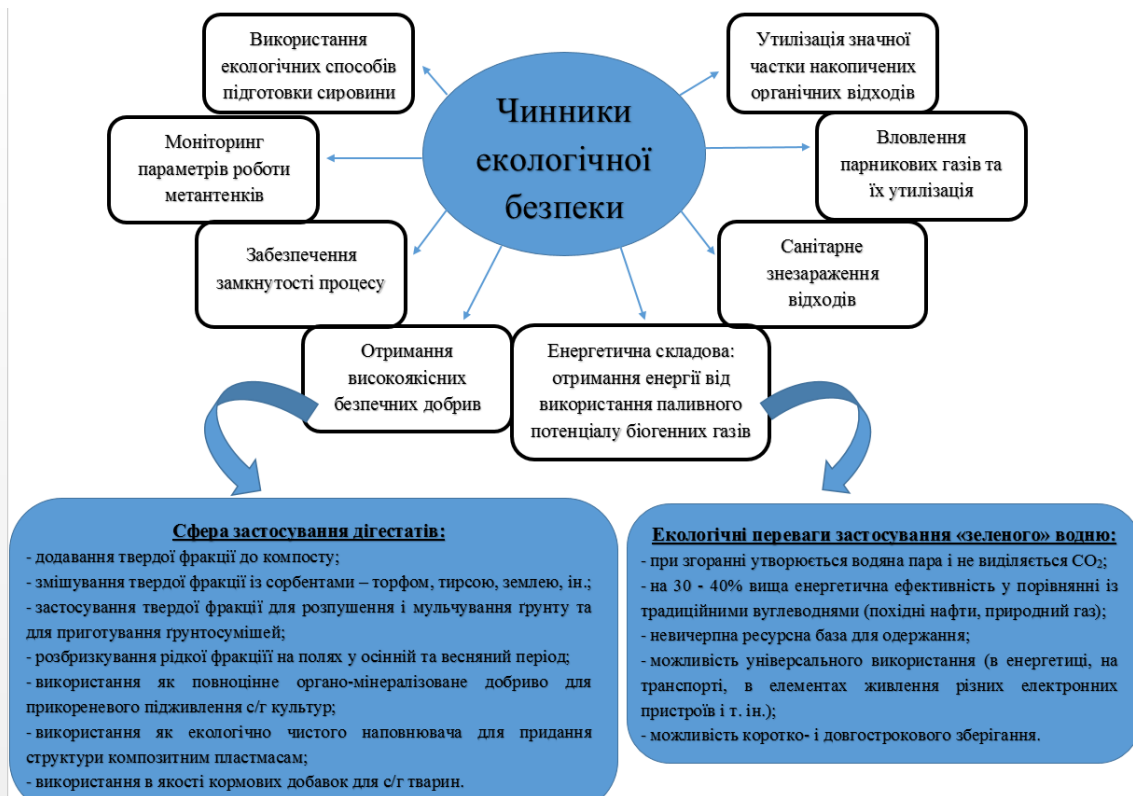


Рисунок 3.8 - Чинники екологічної безпеки процесів анаеробної ферментації

Біотехнологічні виробництва, до числа яких відноситься анаеробне ферментування, використовують різноманітну сировину та хімікати, випускають багато видів продукції в різних формах. Найбільш надійним способом забезпечення біобезпеки біотехнологічних виробництв є організація виробництва з додержанням правил асептики. Проте, при анаеробному знезараженні рідких і твердих органічних відходів різного походження (комунальні, промислові стоки, тверді побутові відходи, відходи агросектору) немає необхідності використовувати методи стерилізації.

При анаеробному метановому бродінні практично будь-які органічні речовини (за винятком лігніну) можуть бути субстратами, що трансформуються до метану і діоксиду вуглецю. Метан, що утворюється наприклад при відкритому бродінні відпрацьованого активного мулу і неефективному відстоюванні стічних вод, уловлюється в газгольдері, що запобігає потраплянню цього газу в атмосферу, а потім використовується як екологічне паливо. Діоксид вуглецю, що виділяється, обов'язково вловлюється та утилізується в харчовій промисловості

Інв.№попдл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

як холодоагент, наприклад, «сухий лід» [41].

У результаті використання технології анаеробного зброджування, окрім санітарного знезараження відходів, зберігаються живильні речовини, що входять до їх складу. Тому тверді залишки після метанового бродіння (приблизно 40 % від початкової кількості) використовують як добриво при вирощуванні сільськогосподарських культур. У збродженій біомасі мінералізація складає 60 % і мінерали переходять у форму, доступну рослинам. Застосування таких біодобрив дозволяє знизити частку використання мінеральних добрив при вирощуванні сільськогосподарських культур. Отримані біодобрива за більшістю критеріїв в декілька разів кращі ніж інші органічні добрива, типу гною, посліду, чи торфу. Деякі з них полягають у наступному:

- 1) відсутність насіння бур'янів;
- 2) відсутність патогенної мікрофлори;
- 3) наявність активної мікрофлори (в забродженій масі міститься біля  $10^{14}$  колоній мікрофлори на грам), що інтенсифікує ріст рослин;
- 4) не мають періоду адаптації (зброджені добрива через свою форму проявляють ефективність одразу після внесення у ґрунт);
- 5) стійкість до вимивання з ґрунту поживних елементів (вимивається не більше 15%, тому добрива не втрачають свою ефективність на 3-5 років довше, ніж звичайні);
- 6) максимальне збереження і накопичення азоту (завдяки анаеробному зброджуванню органічних відходів у біогазовій установці кількість загального азоту зберігається повністю, крім того, вміст розчинного азоту  $\text{NH}_4$  збільшується на 10 - 15%.);
- 7) екологічний вплив на ґрунт, оскільки є абсолютно чистим екологічним добривом [42].

Звертаючи увагу на те, що біогазова установка вважається потенційно небезпечним об'єктом для робітників, необхідний безупинний моніторинг параметрів роботи реактора для забезпечення техногенної та екологічної безпеки

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
------------	--------------	-------------	------------	--------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

**EK 19510242**

Арк

53

інженерних споруд [43].

Задля забезпечення повної замкнутості процесу продукування біогазу та зменшення витрат технологічної води, яка використовується для стабілізації показників вологості, важливим є її очищення після сепарації зброженого залишку та повторне використання в технологічному процесі. Оскільки в такій воді висока концентрація азотовмісних сполук, то у роботі Козловець О.А. (2017) пропонується двостадійне очищення в анаеробному процесі за використання стадій нітрифікації та денітрифікації, при перебігу яких азотовмісні сполуки переходять в молекулярний азот та вивільняються в атмосферу [44].

Основними джерелами екологічної небезпеки є наявність у складі органічних відходів яєць гельмінтів, бактерій груп кишкової палички та іншої патогенної мікрофлори. Тому необхідно дотримуватися запобіжних заходів для попередження зараження. Так, не рекомендується споживати їжу в приміщення ферми та поряд з біогазовими установками [43].

Інв.№покл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата					Арк
Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<b>ЕК 19510242</b>				54

## РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ ІЗ БІОГАЗУ

У роботі *Marcoberardino зі співавторами (2018)* на основі термодинамічних результатів розроблялася економічна модель для оцінки кінцевої вартості виробництва водню (євро / кг), де видаткові матеріали, допоміжні засоби та постійні витрати додаються до загальної вартості установки (ЗВУ), як виражено в рівнянні (4.1) [45]:

$$НВВ = \frac{(ЗВУ \cdot ККВ) + C_{E\&O_{fix}} + (C_{E\&O_{var}} \cdot h_{eq})}{\text{кг}_{H_2} \text{ або } (N_{m^3_{H_2}})} \quad (4.1)$$

де НВВ – нормована вартість водню;

ЗВУ – загальна вартість установки;

ККВ – коефіцієнт капітальних витрат (ККВ = 0,16);

$C_{E\&O_{fix}}$  – постійні витрати на експлуатацію та обслуговування (табл.4.2);

$C_{E\&O_{var}}$  – змінні витрати на експлуатацію та обслуговування (табл. 4.2);

$h_{eq}$  – тривалість роботи установки ( $h_{eq} = 7500$ );

$\text{кг}_{H_2}$  або  $(N_{m^3_{H_2}})$  – кількість виробленого водню (кг або м<sup>3</sup>).

Загальна вартість установки розраховується по висхідному принципу, при якому електростанція розбивається на основні компоненти або обладнання, а потім додаються витрати на установку (ВУ), непрямі витрати (НВ), а також витрати власника і непередбачені витрати (ВВ & Н), як визначено в рівнянні (4.2).

$$ЗВУ = [(\sum_i C_{i,2017} \cdot (1 + \%_{ВУ})) \cdot (1 + \%_{НВ})] \cdot (1 + \%_{ВВ\&Н}) \quad (4.2)$$

де  $C_{i, 2017}$  - вартість обладнання; %

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп і дата
------------	--------------	-------------	------------	-------------



$$BY = 0,8\%;$$

$$\% HB = 0,14\%;$$

$$\% BV\&H = 0,15.$$

Витрати на компоненти, отримані з кількох літературних джерел, цитат і звітів, потім масштабуються і актуалізуються, як визначено в рівнянні (4.3), де річні витрати  $C_{i,y}$  потім виводяться з витрат  $C_{i,0}$  базового компонента розміру  $S_{i,0}$  з фактичним розміром  $S$  і масштабним коефіцієнтом  $f$ . Причому для актуалізації вартості компонента застосовується індекс СЕРСІ (індекс витрат хімічних заводів) - це безрозмірна величина, яка використовується для оновлення капітальних витрат, необхідних для спорудження хімічного заводу з минулої дати на більш пізній час, після зміни вартості внаслідок інфляції та дефляції. Тобто це відношення фактичної ціни в періоді часу порівняно з ціною у вибраному базовому періоді (у визначений момент часу або середньою ціною в певному році), помножене на 100. Індекс СЕРСІ 2017 року дорівнює 562,1. Вартість обладнання та їх відносний індекс СЕРСІ наведені в таблиці 4.1.

$$C_{i,2017} = \left( C_{i,0} \left( \frac{S_i}{S_{i,0}} \right)^f \right)_y \cdot \frac{СЕРСІ_{2017}}{СЕРСІ_y} \quad (4.3)$$

Таблиця 4.1 - Передбачувані витрати на компоненти установки

Компоненти	Параметр масштабування	$S_0$	$C_0$ , тис.€ / млн.грн	$f$	Варт./СЕРСІ рік	СЕРСІ
1	2	3	4	5	6	7
Паровий риформер (SR)	Вага (кг)	58 967	70,32 / 2,350	0,3	2007	525,4
Зсув водного газу (WGS)	Вага (кг)	58 967	7,32 / 0,250	0,3	2007	525,4
Автотермічний риформер (ATR)	Вага (кг)	58 967	70,32 / 2,350	0,3	2007	525,4
Теплообмінник	Площа обміну ( $m^2$ )	2	15,5 / 0,518	0,59	2007	525,4

Інв.№поділ.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

56

## Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7
Біогазовий компресор	Потужність (кВт)	5	3,3 / 0,111	0,82	2006	499,6
Повітряний компресор	Потужність (МВт)	0,68	3,42 / 0,115	0,67	2009	521,9
Демінералізатор води	Витрата води (1 <sub>H2O</sub> / год)	90	2,1 / 0,071	0,68	2011	585,7
Водяний насос	Витрата води (1 <sub>H2O</sub> / год)	90	1,2 / 0,040	0,7	2011	585,7
Компресор Н <sub>2</sub>	Потужність (к. С.)	1	0,12 / 0,004	0,3	1987	324
Компресор Н <sub>2</sub> 700 бар	Потік на вході (кг / год)	4,79	22 / 0,735	0,82	2006	499,6
Вакуумний насос	-	-	-	-	1986	318
Блок адсорбції вакуумного тиску	Потік на вході (кмоль / год)	17,069	27,95 / 0,934	0,6	2007	525,4
Пальник	-	-	-	-	2013	567,3

Постійні і змінні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування, допоміжне обладнання, страхування та персонал представлені в таблиці 4.2. Вартість звалищного газу менше, ніж у анаеробного бродильного котла, так як інвестиційні витрати заводу, необхідні для його виробництва, є нижчими. Витрати на оплату праці встановлюються для двох операторів з терміном будівництва один рік. Для аналізу було взято дані із [45].

Таблиця 4.2 - Постійні і змінні витрати на експлуатацію та обслуговування

Компоненти	Одиниці	Вартість
1	2	3
Паровий риформер або автотермічний риформер	тис. € / м <sup>3</sup> млн. грн / м <sup>3</sup>	50 (термін служби 5 років) 1,673
Каталізатор зсуву водного газу	тис. € / м <sup>3</sup> тис. грн / м <sup>3</sup>	14 (термін служби 5 років) 469,5
Смола деіонізації	€ / рік тис. грн / рік	447 (термін служби 5 років) 14,96

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

EK 19510242

Арк

57

## Продовження таблиці 4.2

1	2	3
Звалищний біогаз	€ / ГДж	1,50
	грн / ГДж	50,2
Анаеробний зброджувач	€ / ГДж	3,46
	грн / ГДж	115,8
Електрична енергія	€ / кВт-год	0,12
	грн/кВт-год	4,02
Технологічна вода	€ / м <sup>3</sup>	0,35
	грн / м <sup>3</sup>	11,7
Технічне обслуговування	-	2 % від загальної вартості установки
Страховання	-	2,5 % від загальної вартості установки
Оплата праці	€	60000
	млн. грн	2,008

Значення найбільш цікавих випадків з точки зору кінцевої вартості виробництва водню представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Загальна вартість обладнання та загальна вартість обладнання для різних розглянутих макетів. Усі витрати представлені в тис. грн

Вартість в тис. грн	Паровий риформер		Автотермічний риформер	
	Звалищного газу	Для АФ	Звалищного газу	Для АФ
1	2	3	4	5
Тиск (бар)	8	14	12	14
Реактори	264,0	276,4	294,9	273,1
Реактор зсуву водяного газу	60,6	67,7	84,2	82,8
Блок адсорбції вакуумних коливань тиску	571,7	491,6	765,6	766,6
Теплообмінники	410,4	389,5	261,9	275,1
Біогазовий компресор	168,7	146,5	300,0	225,2
Повітряний компресор	0	0	11,8	11,5
Компресор Н <sub>2</sub>	8,4	5,4	5,7	5,1
Демінералізатор води	31,3	28,6	22,6	20,5

Підп. і дата	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ЕК 19510242	Арк
						58

## Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
Водяний насос	36,7	3,0	43,1	38,7
Вакуумний насос	237,4	172,1	392,9	368,7
Пальник	166,7	166,7	333,7	333,7
Компресор Н <sub>2</sub> 700 бар	743,4	743,4	743,4	743,4
Загальна вартість обладнання, (млн. грн)	2,7	2,5	3,3	3,1
Загальна вартість установки, (млн. грн)	6,4	5,9	7,7	7,4

При аналізі встановлено, що адсорбційна установка зі змінним вакуумним тиском, реактори і теплообмінники разом з додатковими компресорами Н<sub>2</sub> (до 700 бар) складають більшу частину загальної вартості обладнання.

Додатковий компресор Н<sub>2</sub> для застосування на заправній станції має таку ж вартість, оскільки тиск подачі водню для всіх випадків = 20 бар. Адсорбційна установка зі змінним тиском у вакуумі, включаючи вакуумний насос, є найдорожчим компонентом через свою складність і надає більший вплив на компонування установки автотермічного риформінгу, де швидкість потоку технологічного газу вище. З іншого боку, вартість теплообмінника менша для випадку автотермічного риформінгу, де теплова інтеграція дозволяє зменшити необхідну площу поверхні, в той час як вартість реактора досить схожа.

Зрівняльні витрати водню представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Порівняння нормованої вартості водню для різних аналізованих випадків при 20 і 700 бар

Одиниці		Паровий риформер				Автотермічний риформер					
1		2				3					
Тиск		Бар		6	8	10	14	6	10	14	18
Нормована вартість водню (20 бар)	Звалищний біогаз	€/кг грн / кг	4,247	4,250	4,255	4,292	6,419	6,381	6,436	6,596	221,89
	Біогаз від АФ		142,87	142,97	143,14	144,38	215,93	214,65	216,5	221,89	
			4,238	4,222	4,208	4,209	6,472	6,407	6,373	6,411	215,66
			142,56	142,03	141,56	141,59	217,72	215,53	214,39	215,66	

Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата
Інв. № подл.			

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

59

1			2				3			
Нормована вартість водню (700 бар)	Звалищний біогаз	€/кг грн / кг	5,040	5,043	5,048	5,085	7,146	7,108	7,163	7,323
	Біогаз від АФ		169,54	169,64	169,81	171,06	240,39	239,11	240,96	246,34
			5,003	4,987	4,973	4,974	7,197	7,132	7,098	7,136
			168,3	167,76	167,29	167,32	242,1	239,92	238,77	240,05

Аналізуючи перспективи можливого ведення в дію комплексів з отримання біоводню та біометану необхідно звернути увагу на зарубіжний досвід. Так, законодавство Латвії не передбачає умов для введення біометану в мережу природного газу. Але необхідно розглянути питання енергетичної політики, яка підтримує інжекцію біометану в природну газову мережу.

Проекти виробництва біометану географічно розміщені в європейських країнах, Північній Америці (США, Канада), а також далекосхідних країнах: Японії та Північній Кореї (рис. 4.1) [46].

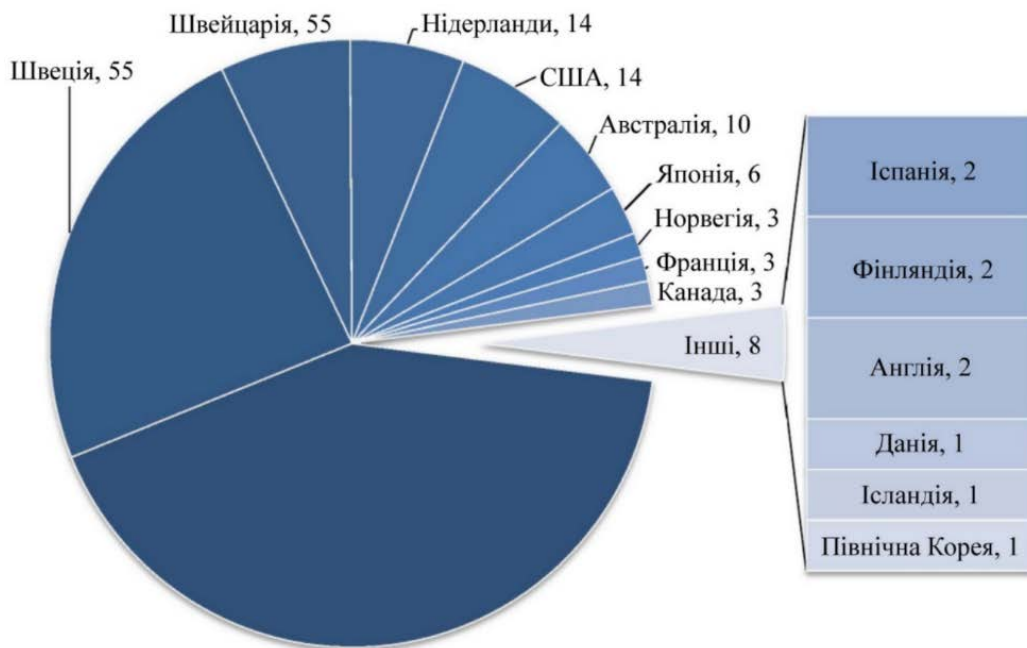


Рисунок 4.1 – Кількість проектів виробництва біометану в світі [46]

Незважаючи на те, що в даний час введення біометану не регулюється на європейському рівні, деякі країни, наприклад, Німеччина, у 2012 році запровадили законодавство, яке регулює введення біометанової сітки. На

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

початковій стадії, коли в Німеччині були побудовані перші заводи з виробництва біометану, в країні такого законодавства не існувало. Перші інноваційні станції були створені за домовленістю між основними зацікавленими сторонами, такими як оператор біогазової установки, оператор мережі природного газу та органи влади [47].

Слід підкреслити, те що в Україні тільки невелике число підприємств (до 2% від загальної кількості) мають можливість здійснити проекти отримання біометану (БМ) з продуктивністю від 100 м<sup>3</sup>/год біогазу та більше, використовуючи лише об'єми відходів власних виробництв. У більшому ступені це великомасштабні птахофабрики, цукрові та спиртові заводи. Можливість реалізації крупних проектів (2000 м<sup>3</sup> /год біогазу і більше) на сировині окремо взятого підприємства обмежені одиничними прикладами. Виходячи з цього, перспективними проектами виробництва БМ можуть бути проекти, в яких реалізується сумісне зброджування відходів декількох підприємств та/або рослинної сировини. Масштабне ж нарощування виробництва біометану вимагає використання частини сільськогосподарських угідь для вирощування рослинної сировини [46].

Важливим напрямом є впровадження міжнародного співробітництва в сфері використання відновних джерел енергії, зокрема біоводню та біометану. У цьому напрямі діють різні грантові програми на рівні ЄС, які дозволяють реалізовувати проекти виробництва боводню та біометану на регіональному рівні.

Україна є асоційованим членом **програми EUREKA** - найбільш розвиненого потужного механізму для налагодження міжнародного науково-технічного співробітництва. EUREKA забезпечує виконання проекту, коли з найрізноманітніших причин це неможливо зробити зусиллями однієї країни. Діяльність програми ЕВРИКА поширюється на різноманітні області, в тому числі енергетики, зелених технологій та охорони навколишнього середовища.

Інв.№поذل.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

61

В рамках EUREKA існує так звана підпрограма EUROSTARS - європейська програма підтримки досліджень та розробок, що проводяться компаніями малого та середнього бізнесу (МСБ). Вона спрямована на сприяння дослідженням і розробкам в будь - якій технологічній області, що націлені на розвиток нового продукту, процесу чи послуги [48].

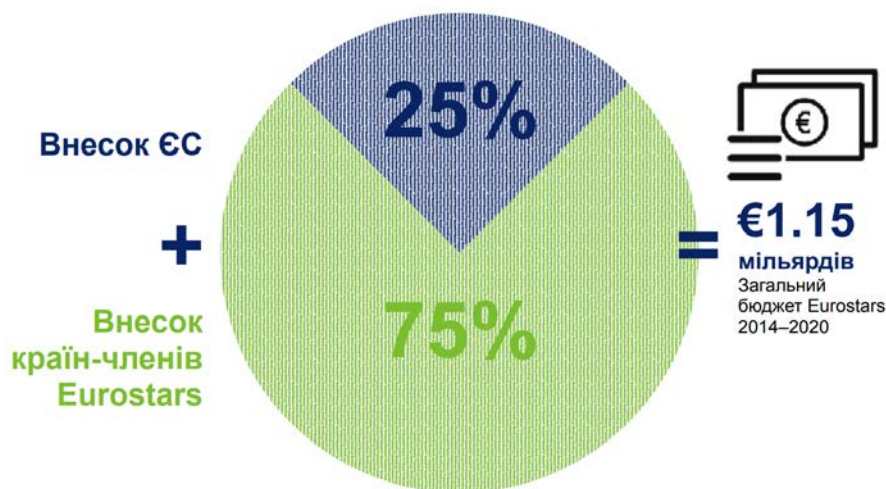


Рисунок 4.2 – Джерела фінансування програми EUROSTARS

З травня 2016 року Україна є офіційним учасником європейської програми підтримки малого та середнього підприємництва **COSME**. Приєднання до COSME відкриває Україні доступ до бюджету програми у розмірі близько **900 млн. євро**. Фінансові ресурси будуть надаватися у вигляді грантів на фінансування проектів, які підтримують експортну та інноваційну діяльність МСБ [49].

**Європейський зелений курс (чи European Green Deal)** – це програма дій ЄС, у центрі якої – план переходу до кліматично нейтральної Європи до 2050 року. Можливості від ЄЗК пов’язані із високим рівнем інтеграції України в окремих секторах, зокрема в енергетиці – співпраця щодо водневої енергетики. Планується, що на запровадження цього курсу буде виділено 1 трильйон євро протягом наступних 10 років. Крім того, ЄС виділить ще 100 мільярдів на фінансування механізму справедливого переходу. Це відкриває унікальні можливості українським дослідникам, науковцям та підприємцям подаватися на

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

62

гранти для впровадження нових методів виробництва або фінансування відповідних досліджень [50].

В рамках реалізації положень Меморандуму про взаєморозуміння у сфері енергоефективності та відновлювальної енергетики між Державним агентством з енергоефективності та енергозбереження України та МЗС Фінляндської Республіки в Україні створено **Фінсько-український трастовий фонд**. Його ціль - сприяння співпраці між Фінляндією та Україною та виявлення можливостей для проектів, як консультаційних послуг, так і інвестицій, у сферах енергоефективності, відновлюваної енергетики та систем утилізації відходів з отриманням енергії.

Трастовий фонд фінансується Міністерством закордонних справ Фінляндії та управляється НЕФКО. Грантове фінансування може надаватися як державним, так і приватним демонстраційним проектам, що реалізуються українськими підприємствами, або для технічної допомоги. При цьому надається перевага представникам малого та середнього бізнесу. Також існує вимога, яка зобов'язує власників проекту зробити свій внесок. Але, витрати на технічну частину, наприклад, консалтинг чи програмне забезпечення, можуть бути відшкодовані в об'ємі до 100% вартості [51].

Інв.№поذل.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

Арк

63



## РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що виникають під час процесів рециклінгу відходів

При поводженні з об'ємами твердих побутових відходів (ТПВ) і матеріалами вторинної сировини на робітника впливають небезпечні та шкідливі фактори. Основні з них:

#### 1. Хімічні фактори:

– підвищений рівень газів у повітрі робочої зони і в зоні дихання:

а) метан – газ IV класу безпеки. Його ГДК у повітрі робочої зони - 300 мг/м<sup>3</sup>. Токсична дія СН<sub>4</sub> при нормальних умовах визначається недостатньою концентрацією кисню (всього 15-16% з необхідних 21%);

б) сірководень – газ IV класу безпеки, ГДК у повітрі робочої зони становить 10 мг/м<sup>3</sup>. При потраплянні в організм, відбуваються процеси окислення і утворення неорганічних сполук. Н<sub>2</sub>S паралізує нюхові нерви, внаслідок чого людина не відчуває запах газу, що викликає сильні отруєння;

в) аміак – газ IV класу безпеки. Вирізняється сильною токсичною дією на організм людини.

#### 2. Фізичні фактори:

– підвищена запиленість повітря робочої зони;

– викиди речовин з неприємним запахом;

– високий рівень шуму і вібрації від обладнання, що при тривалій дії призводить до професійної туговухості;

- підвищення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;

– машини, що пересуваються та рухливі механізми обладнання можуть призвести до травм, поранень чи загибелі людини рухливими частинами;

Інв.№покл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

ЕК 19510242

Арк

64

- підвищена  $t^0$  поверхонь призводить до можливості одержання працівником термічних опіків, а підвищена  $t^0$  повітря в робочій зоні може викликати збій терморегуляції організму;

– недостатня освітленість робочого місця, що веде до втрати зору, викликає стомлення.

### 3. Психофізіологічні фактори:

– фізичне та нервово-психічне перенавантаження, статична та динамічна перенапруга, напруження зорових аналізаторів [52].

Під час проектування біогазових установок розробляються заходи, що забезпечують безпеку працюючих на виробництві в процесі експлуатації приладів, засобів автоматизації, щитових пристроїв системи автоматики у відповідності до Державних актів.

Для попередження несприятливого впливу на здоров'я робітників факторів виробничого середовища, вони повинні проходити обов'язкові попередні та періодичні медичні огляди. Крім того, вони повинні бути забезпечені спеціальним одягом, взуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Під час експлуатації обладнання для продукування біогазу і його використання потрібно брати до уваги вибухонебезпечність метану. У зв'язку з цим на установці для відділення метану і в прилеглий до неї зоні потрібно чітко слідувати вимогам заходів безпеки для недопущення пожежі і вибуху.

Експлуатація кожної окремої установки, такої як барабан, конвеєр, дробарка, тощо, передбачає дотримання індивідуальних норм і правил безпеки. Експлуатація технологічного обладнання здійснюється відповідно до інструкцій по експлуатації і фірмовою технічною документацією [53].

На основі статистичних даних встановлено можливі зони ризику БГУ: ревізійний отвір в реакторі для мішалки; незворушне оглядове вікно; запобіжник гранично високого тиску; виведення повітря з газгольдера; подача повітря в газгольдер. Тому, необхідно розробляти систему керування охороною праці на біогазових установках згідно з міжнародним стандартом.

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
------------	--------------	-------------	------------	--------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

65

## 5.2 Оцінювання інженерної обстановки та соціально – економічних наслідків надзвичайних ситуацій

Оцінювання умов в надзвичайній ситуації (НС) є важливою складовою у комплексі захисних заходів населення та об'єктів господарювання. В залежності від дії вражаючих чинників обстановка при НС може бути різною і впливати на проведення рятувальних робіт в осередку ураження. Виділяють і оцінюють: радіаційну, хімічну, інженерну, пожежну, санітарно-епідеміологічну та ін.

Інженерна обстановка – це сукупність наслідків стихійного лиха, аварій (катастроф), а також первинних і вторинних вражаючих факторів засобів ураження, в результаті яких руйнуються будинки, споруди, комунально-енергетичні мережі, засоби зв'язку і транспорт, мости, греблі, аеродроми і т.д., що впливає на стійкість об'єктів економіки та життєдіяльність населення [54].

Оцінка інженерної обстановки включає:

а) визначення масштабів та ступеня руйнування елементів і об'єктів у цілому (ступеня руйнування будівель, споруд, у тому числі захисних споруд, розмірів зон завалів, обсягу і трудомісткості інженерних робіт, можливостей рятувальних та інших невідкладних робіт);

б) аналіз їхнього впливу на стійкість роботи елементів і об'єкта дій вражаючих факторів та її підвищення, пропозиції з організації та проведення рятувальних та інших невідкладних робіт з відновленням виробництва.

Оцінка інженерної обстановки проводиться на основі сумісного використання даних прогнозування та інженерної розвідки [55].

### 5.2.1 Оцінювання стану ураження міст та населених пунктів

Під час оцінювання матеріальних збитків і величини втрат населення в містах, після НС, що викликані вибухами і виникненням ударної повітряної хвилі, за узагальнений критерій приймається ступінь ураження міста.

*Ступінь ураження міста (населеного пункту)  $S_y$*  являє собою відношення площі міста (населеного пункту, що опинилася в зоні повних і сильних руйнувань будинків, споруд, комунікацій і об'єктів господарської діяльності

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

66

$S_{п.с.р.}$  до загальної площі міста (населеного пункту)  $S_{м.(нас.п.)}$ .

$$C_y = \frac{S_{п.с.р}}{S_{м.(нас.п.)}} \quad (5.1)$$

Прийняті ступені ураження міст (населених пунктів) та об'єктів господарської діяльності в залежності від величини розрахункового відношення наведені в таблицях А.5.1-А.5.2 Додатку А [55].

Необхідність в особовому складу формувань та інженерній техніці для проведення рятувальних і невідкладних аварійних робіт визначається за нормами чисельності особового складу і техніки формувань в тис. чоловік з розрахунку на 100 тис. населення в залежності від ступеню ураження. Сили і медичної служби визначаються, виходячи із к-сті санітарних втрат населення. Допомога надається безперервно за змінами, з розрахунку роботи 10 год/зміну.

Оцінка стану інженерних мереж і комунікацій міста (населеного пункту) визначається за можливою кількістю аварій в залежності від ступеню ураження міста (населеного пункту), площі забудови та протяжності комунікацій в метрах на км<sup>2</sup> площі, що наведені в таблиці А.5.3 Додатку А.

### **5.2.2 Оцінка інженерної обстановки на об'єкті господарської діяльності**

Під час оцінки інженерної обстановки на об'єкті господарської діяльності у повній мірі застосовуються розрахункові дані і результати паспортизації будинків, споруд та інженерно-технічних систем забезпечення.

Ступінь руйнування об'єкту в процесі паспортизації може орієнтовно = ступеню руйнування основних будинків, споруд, комунікацій при тисках ударної повітряної хвилі для слабких, середніх, сильних і повних руйнувань. За довідковими даними для аналогічних за типом конструкцій визначаються відповідні ступені руйнувань при показниках тиску 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 кгс/см<sup>2</sup>.

Для промислових точкових (п-ва компактної забудови) об'єктів слабкі, середні, сильні і повні ступені руйнування можуть бути визначені залежно від

Інв.№покл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп і дата
------------	--------------	-------------	------------	-------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

**EK 19510242**

Арк

67

кількості вибухових речовин (тротилу) на 1 км<sup>2</sup> або від тиску у фронті ударної хвилі вибуху газоповітряної (вуглецево-повітряної) суміші (таблиця 5.4) [56].

Таблиця 5.4 – Визначення ступеню руйнування об'єктів господарської діяльності в залежності від характеру дії на нього [56]

Характер дії на об'єкт	Ступінь руйнування об'єкту господарської діяльності			
	Слабка	Середня	Сильна	Повна
Вибух ВВ (тротил), тн	4,5	13,5	24	45
Вибух ГПС (ВПС), кгс/см <sup>2</sup>	0,1	0,2	0,3	0,5

В залежності від ступеню ураження об'єкту визначається склад сил і засобів для проведення інженерних робіт. Кількість формувань для виконання одного виду роботи визначається за формулою:

$$N_{\phi} = \frac{T}{t} \quad (5.2)$$

де  $t$  - тривалість роботи у зміну (орієнтовно 10 годин).

При визначенні інженерної обстановки на об'єкті господарської діяльності необхідний комплексний підхід, який враховує всі елементи можливої дії на об'єкт як первинних, так і вторинних факторів ураження.

Усі збитки від наслідків НС техногенного і природного характеру поділяються на види залежно від завданої фактичної шкоди. Загальний обсяг збитків від наслідків НС розраховується за методикою, наведеною у Додатку Б.

Відповідно до територіального поширення та обсягів заподіяних або очікуваних економічних збитків, кількості людей, які загинули, за класифікаційними ознаками, визначають чотири рівні надзвичайних ситуацій: державний, регіональний, місцевий та об'єктовий. Для кожного типу НС згідно з класифікатором встановлюється перелік основних характерних збитків щодо кожного рівня залежно від масштабів шкідливого впливу [57].

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

**EK 19510242**

Арк

68

## ВИСНОВКИ

У ході розроблення дипломного проєкту було:

1. Проаналізовано екологічний вплив комплексів тваринництва та рослинництва на компоненти навколишнього середовища, виокремлено існуючі напрями екологічно безпечного поводження з органічними відходами, в тому числі і з використанням методів біотехнології, а також обґрунтовано ефективність використання органічних відходів різного генезису як відновного джерела енергії та наведено класифікацію технологій перетворення енергії біомаси. Досліджено основи процесу темної ферментації як способу отримання біоводню. Додатково охарактеризовано апаратне оснащення, необхідне для анаеробного біологічного перероблення органічних відходів.

2. Розроблено методологію моделювання біопроцесів рециклінгу відходів за допомогою різноманітних онтологічних інструментів: біоінформаційних електронних баз даних KEGG database, BacDive та EAWAG-BBD; наукометричної бази даних Scopus і методів візуалізації за програми VOSviewer.

3. Здійснено моделювання кластерів розвитку досліджень у галузях темної ферментації і метанового бродіння органічних відходів за допомогою методів візуалізації VOSviewer програми. Описано та доведено вплив мінеральних добавок та ко-субстратів на перебіг процесу анаеробного збродження органічних відходів задля отримання біосировинних продуктів, вивчено умови інтенсифікації процесів. Розроблено інтегровану модель комбінації процесів виробництва водню та метану, виокремлено чинники екологічної безпеки процесів генерації біометану та біоводню на стадіях анаеробного збродження.

4. На основі термодинамічних результатів розроблена економічна модель для оцінки кінцевої вартості виробництва водню із біогазу, виконано економічне оцінювання впровадження систем таких виробництв. Розглянуто

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
------------	--------------	-------------	------------	--------------

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

**EK 19510242**

Арк

69

зарубіжний досвід у сфері введення в дію комплексів з отримання біоводню та біометану. Доведено важливість напрямку впровадження міжнародного співробітництва в сфері використання відновних джерел енергії, зокрема біоводню та біометану.

5. Вивчено основні небезпечні та шкідливі фактори, що негативно впливають на працівників при поводженні з твердими побутовими відходами і вторинною сировиною: хімічні, фізичні та психофізіологічні фактори. Розглянуто етапи оцінки інженерної обстановки та соціально – економічних наслідків надзвичайних ситуацій. Наведено особливості оцінювання стану ураження міст і населених пунктів та інженерної обстановки на об'єкті господарської діяльності.

Інв.№попл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп і дата

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

**EK 19510242**

## ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Палапа Н. В. Промислове тваринництво: еколого-економічні наслідки / Н. В. Палапа, Н.Б. Пронь, О.В. Устименко // Збалансоване природокористування. – 2016. - № 3. - С. 64-67. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zp\\_2016\\_3\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zp_2016_3_12)
2. Слепченко Ю.В. Розробка анаеробного реактора для виробництва біогазу: магістерська дисертація / Слепченко Ю.В.; . керівник д.т.н., професор Мельник В.М. –Київ: НТУУ «КПІ», 2018. - 160 с.
3. Марцинкевич В., Коломієць Н. Поводження з відходами тваринництва: переваги технології анаеробного зброджування / В. Марцинкевич, Н. Коломієць. - Нац.. екологічний центр України (НЕЦУ). - Київ. – 2015. - 21 с.
4. Малимон С.С. Основи екології: підручник / С.С. Малимон.- Вінниця: Нова книга, 2009. - 240 с.
5. Ресульєва Н.Ш. Перспективи використання відходів рослинництва для вироблення біоенергії в Україні / Н.Ш. Ресульєва // Економіка: реалії часу. - 2015. - №4(20). - С. 179 – 185.
6. Ратушняк Г. С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання: навч. посібн. / Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула, К.В. Анохіна. - Вінниця: ВНТУ, 2010. - 170 с.
7. Степанов Д. В. Оцінка можливостей отримання енергоносіїв з органічних відходів з урахуванням техногенного навантаження на навколишнє середовище / Д.В. Степанов, С. Й. Ткаченко, А.П. Ранський // Наукові праці ВНТУ. - 2012. - № 1. - С. 1 – 7.
8. Пузік В.К. Знешкодження та утилізація відходів в агросфері: навч. посібн. / В.К. Пузік, Р.В. Рожков, Т.А. Долгова. – Харків: ХНАУ, 2014. - 220 с.
9. Бунецький В.О. Аналіз технологічних процесів отримання твердого палива у вигляді пеллет або брикетів / В.О. Бунецький // Вісник центру наукового забезпечення АПВ Харківської області. -2011. - Вип. 10. - с. 328-340.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

71



10. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Кн. 5 : Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі / Т. О. Бурячок, З. Ю. Буцьо, Г. Б. Варламов, С. В. Дубовської, В. А. Жовтянський; Наук. ред. В. Н. Клименко, Ю. О. Ландау, І. Я. Сігал. — 2013. — 390 с. — [ISBN 978-966-8163-18-0](https://doi.org/10.1007/978-966-8163-18-0)

11. Данюк К.О., Болтянська Н.І. Аналіз технологій переробки біомаси // Тези доповідей I Всеукраїн. наук.-практ. інтернет-конференції «Інноваційні технології в агропромисловому комплексі». - Мелітополь. – 2020. -С. 16-20.

12. Панцирева Г.В. Технологічні аспекти виробництва біогазу з органічної сировини / Г.В. Панцирева // Вісник Харків. нац. техніч. ун-ту с.-г. ім. П. Василенка. - 2019. - Вип. 199. - С. 276-290.

13. Анаеробна ферментація біомаси [Електронний ресурс]. Отримання біогазу та органічних добрив при анаеробній ферментації. 2015. Режим доступу - <https://sites.google.com/site/otrimannabiogazu/anaerobna-fermentacia-biomasi>

14. Куріс Ю. В. Метаногенез і технологічні схеми отримання біогазу / Ю.В. Куріс // Альтернативные источники энергии. – 2011. - №10 (92). - С. 41 – 48.

15. Шомин А. А. Биогаз на сельском подворье: книга / А.А. Шомин. - Балаклея: Информационно-издательская компания "Балаклійщина", 2002. - 68 с.

16. Чучуй В. П. Альтернативні джерела енергії: книга / В. П. Чучуй, С. М. Уминський, С. В. Інютін. – Одеса: ТЕС, 2015. – 398 с.

17. Miller R. Inorganic Fertilizer Vs. Organic Fertilizer [Electronic resource]. Garden Care. 2018. URL - <https://homeguides.sfgate.com/inorganic-fertilizer-vs-organic-fertilizer-39528.html>

18. Рибчинський Л.М. Екологічні аспекти водневої енергетики: кваліфікац. робота магістра / Л.М. Рибчинський; наук. керів. О.А. Бургаз. – Одеса: ОДЕУ, 2017. – 63 с.

19. Sołowski G. Production of hydrogen and methane from lignocellulose waste by fermentation. A review of chemical pretreatment for enhancing the efficiency

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк

72

of the digestion process. / G. Sołowski, I. Konkol, A. Cenian // Journal of Cleaner Production. – 2020. - Volume 267, 121721. – p. 2 – 15. - <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121721>

20. Шуліна Є. О., Черниш Є. Ю. Процеси темної ферментації для утилізації відходів з отриманням корисних біосировинних продуктів // Тези доповідей VII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві». – Суми: СумДУ. – 2020. - С. 246 – 247.

21. Щурська К.О. Способи продукування біоводню. Проблеми біології та біотехнології / К.О. Щурська, Є.В. Кузьмінський // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2011. - Вип. 3. - С. 105 – 114.

22. Sołowski G. Methane and hydrogen production from cotton waste by dark fermentation under anaerobic and micro-aerobic conditions / G. Sołowski, I. Konkol, A. Cenian // Biomass and Bioenergy. -2020. - № 138. - P. 1-2.

23. Голуб Г. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / Г. Голуб, О. Гайденко // Агробізнес сьогодні. – 2016. - № 20(339). - С.60-63.

24. Shulipa, Ye. O. Ontological tools in anaerobic fermentation technologies: Bioinformation database applications / Ye. O. Shulipa, Ye. Yu. Chernysh, L. D. Plyatsuk, M. Fukui // Journal of Engineering Sciences. – 2020. -Vol. 7(1). - p. H1–H8, doi: 10.21272/jes.2020.7(1).h1

25. About the EAWAG Biocatalysis [Electronic resource] / Biodegradation Database: Biocatalysis/Biodegradation Database: веб-сайт. URL: <http://eawag-bbd.ethz.ch/aboutBBD.html>

26. Van Eck NJ. VOSviewer Manual / NJ Van Eck, L. Waltman. - Leiden, 2013. P. 52

27. Mahmud, S.S. Potential Utilisation of Dark-Fermented Palm Oil Mill Effluent in Continuous Production of Biomethane by Self-Granulated Mixed Culture / S.S. Mahmud, A.M. Azahar, A.A. Luthfi, et al. // Scientific Reports. – 2020. - Vol. 10, 9167. - <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65702-w>

Підп. і дата	
Інв.№подл.	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	
Інв.№подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<b>EK 19510242</b>	Арк
						73

28. Ingersoll John G. Thermophilic Co-Fermentation of Wood Wastes and High in Nitrogen Animal Manures into Bio-Methane with the Aid of Fungi and its Potential in the USA / John G. Ingersoll // *Energies*. – 2020. – Vol. 13(16), 4257. - <https://doi.org/10.3390/en13164257>

29. H. Muratov, N. Imomova, Z. Ergashev and M. Sultonov. Electric pulse treatment of organic waste before anaerobic fermentation // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. - 883 (2020) 012130. doi:10.1088/1757-899X/883/1/012130

30. Righetti, E. A Multiproduct Biorefinery Approach for the Production of Hydrogen, Methane and Volatile Fatty Acids from Agricultural Waste / E. Righetti, S. Nortilli, F. Fatone, et al. // *Waste Biomass*. – 2020. - Valor 11, 5239–5246. - <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01023-3>

31. Ding C. Biological and fermentative production of hydrogen: Handbook of Biofuels Production / C. Ding, R. Luque, C. S. Ki Lin, K. Wilson, J. Clark. - Woodhead Publishing. – 2016. – p. 770

32. Markov S.A. Hydrogen production by microorganisms and microbial fuel cells using wastewater and waste products / S.A. Markov, E.S. Protasov, V.A. Bybin, D.I. Stom // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. – 2013. - № 01/2 (118).

33. Shulipa Ye.O. Environmental safety of mineral supplements in the anaerobic fermentation of agricultural waste // *Materials VI International scientific and practical conference of applicants for higher education, graduate students and young scientists «Sectoral problems of environmental safety»*, 2020. – Kharkiv: KhNADU. - P. 275 – 277.

34. Kim M. Effects of supplement additives on anaerobic biogas production / M. Kim, D. Li, O. Choi, B. Sang, P. Chi Chiang, H. Kim // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2017. – Vol. 34 . - p. -1-8. DOI: 10.1007/s11814-017-0175-1

35. Linville J. Impact of trace element additives on anaerobic digestion of sewage sludge with in-situ carbon dioxide sequestration / J. Linville, Ya. Shen, R.

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№покл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<b>EK 19510242</b>	Арк
						74

Schoene, M. Nguyen, M. Urgan-Demirtas, S. Snyder // Process Biochemistry. – 2016. – Vol. 51(9), 1283-1289.

36. Lu X. Effects of an iron oxide–zeolite additive on process performance of anaerobic digestion of swine waste at mesophilic, ambient and psychrophilic temperatures / X. Lu, H. Wang, F. Ma, A. Li, G. Zhao // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2018. Vol. 4 (7). - DOI: 10.1039/c8ew00148k

37. Pang H. Cation-exchange resin regeneration waste liquid as alternative NaCl source for enhancing anaerobic fermentation of waste activated sludge: Compositions of dissolved organic matters and chemical conditioning performance / H. Pang, X. Jiang, D. Li, J. He, Zh. Yan, Yi. Ma, Sh. Luo, J. Nan // Bioresource Technology. – 2020. – Vol. 313. - <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123659>

38. Janke L. Ensiling fermentation reveals pre-treatment effects for anaerobic digestion of sugarcane biomass: An assessment of ensiling additives on methane potential / L. Janke, K. Mc Cabe B., P. Harris, A. Hill, S. Lee, S. Weinrich, S. Marchuk, C. Baillie // Bioresource Technology. – 2019. – Vol. 279. - <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.143>

39. Чусов А.Н. Экспериментальный комплекс по производству водорода из органосодержащих отходов для применения в топливных элементах / А. Н. Чусов, Д.В. Молодцов, М.П. Федоров, В.И. Масликов // Энергетика, электротехника. – 2011. - Выпуск: 4 (135). - С. 35 – 41.

40. Семененко И.В. Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов : монография / И.В. Семененко, М.Г. Зинченко. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2012. – 272 с.

41. Пляцук Л. Д. Екологічна біотехнологія: принципи створення біотехнологічних виробництв : навчальний посібник / Л. Д. Пляцук, Є. Ю. Черниш. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 293 с.

42. Карпенко В.І. Утилізація відходів з отриманням біопалива та добрив / В.І. Карпенко, В.В. Козлов, Л.П. Городок, О.В. Горлінський О.В. // Проблеми екологічної біотехнології. - 2012. - № 2. - С. 97–123.

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

EK 19510242

Арк  
75

43. Ополінський І.О. Удосконалення технології утилізації органічних відходів анаеробним зброджуванням з попередньою деструкцією субстрату: дисертац. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / І.О. Ополінський; наук. керів. Ткачук К.К. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2019. - 194 с.

44. Козловець О.А. Біотехнологія одержання біогазу при коферментації посліду птахів: дисертац. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / О.А. Козловець; наук. керівн. Голуб Н.Б. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2017. - 189 с.

45. Marcoberardino G. Di. Green Hydrogen Production from Raw Biogas: A Techno-Economic Investigation of Conventional Processes Using Pressure Swing Adsorption Unit / G. Di Marcoberardino, D. Vitali, F. Spinelli, M. Binotti and G. Manzolini // Processes. – 2018. – Vol. 6, 19. – p. 17 – 20. - doi:10.3390/pr6030019.

46. Гелетуха Г.Г. Перспективи виробництва та використання біометану в Україні / Г. Г. Гелетуха, П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвеев // Аналітична записка БАУ. – 2014. - № 11. - 42 с.

47. Paturska A. Economic assessment of biomethane supply system based on natural gas infrastructure / A. Paturska, M. Repele, G. Vazbauers // Energy Procedia. - 2015. - № 72. - P. 71 – 78.

48. Международная европейская инновационная научно-техническая программа "Eureka" [Електронний ресурс]. Центр практичної інформатики НАН України. Режим доступу - <http://www1.nas.gov.ua/rsc/psc/worldwide/eureka/Pages/default.aspx>

49. Возможности программы COSME для Украины. [Електронний ресурс]. Horizon 2020 NCP "Small and Medium Enterprises". Режим доступу - <https://ncp-sme.kr.ua/?p=1036>

50. Андрусевич А., Андрусевич Н., Козак З., Кравчук В. та ін. 2020. [Електронний ресурс]. Європейський зелений курс: можливості та загрози для

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	<b>EK 19510242</b>	Арк
						76

України: аналітичний документ. Режим доступу - <https://www.irf.ua/wp-content/uploads/2020/07/european-green-dealwebfinal.pdf>

51. Finland Ukraine Trust Fund. URL - <https://www.nefco.org/fund-mobilisation/funds-managed-by-nefco/finland-ukraine-trust-fund/>

52. Лемешев М.С., Майданюк А.Д. Вимоги безпеки під час роботи з установкою для отримання біогазу // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції “Інноваційні технології в процесі підготовки фахівців”, 2016. -Вінниця: ВНТУ. - 104-107 с.

53. Гармаш С.М. Охорона праці та навколишнього середовища на станціях виробництва біогазу. // Научное окружение современного человека: техника и технологии. – 2018. - С. 137-147.

54. Левченко Г. В. Цивільний захист: навч. посібн. / Г.В. Левченко, А.С. Беліков, В.І. Голінько. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016 р. — 325 с.

55. Кулаков М. А. Цивільна оборона: навч. посібн. / М.А. Кулаков, В.О. Ляпун, В.О. Мягкий, В.І. Пугач. – Харків: Факт, 2005. - 363 с.

56. Чеботарьова О. В. Конспект лекцій з дисципліни «Цивільний захист» (для студентів 5 курсу всіх форм навчання спеціальностей 8.03050901, 7.03050901 «Облік і аудит», 8.18010013, 7.18010013 «Управління проектами») / О. В. Чеботарьова; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Х.: ХНУМГ, 2014. – 96 с.

57. Клименко С.Я. Оцінка збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. Метод. рекомендації для викладачів і слухачів обласних курсів цивільного захисту / Львів. Навчально-методичний центр цивільного захисту та безпеки життєдіяльності Волинської області, 2019 – 25 с.

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

77

## ДОДАТОК А

### Прийняті ступені ураження та руйнування

Таблиця А.5.1 – Ступені ураження міст (населених пунктів), % [55]

Ступінь ураження міста (населеного пункту) $C_y$	Характер руйнувань будинків і споруд об'єктів господарської діяльності, %		
	Слабкі	Середні	Сильні і повні
Слабка - < 0,2 (20 %)	До 75	До 5	До 20
Середня - від 0,21(21%) до 0,5 (50%)	До 48	6-12	21-50
Сильна - від 0,51 (51%) до 0,8 (80%)		13-20	51-80
Повна - > 0,8 (80 %)			Більше 80

Таблиця А.5.2 – Ступінь руйнування об'єктів господарської діяльності в залежності від ступеню ураження міста (населеного пункту) [55]

Ступінь руйнування, %	Ступінь ураження міста (населеного пункту)									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Повні і сильні	8	16	20	30	40	50	60	70	85	90
Середні	2	3	5	8	10	12	15	18	15	10

Таблиця А.5.3 – Кількість аварій на інженерних мережах і комунікаціях в залежності від ступеня ураження міста (населеного пункту) [55]

Ступінь ураження міста (населеного пункту)	Протяжність комунікацій (м на кв. км)	Площа міста (населеного пункту) в кв. км			
		До 25	50	100	300
0,1	5000/10000	3/5	5/10	15/20	35/55
0,2		5/10	10/20	25/40	68/120
0,3		8/15	15/30	36/60	100/180
0,4		10/20	20/40	45/80	135/240
0,5		13/25	25/50	55/100	180/300
0,6		15/30	30/60	65/120	210/360
0,7		18/35	37/70	75/140	240/420
0,8		20/40	40/80	90/160	270/480
0,9		23/45	45/90	100/180	300/540
1,0		25/50	50/100	120/200	375/600

Підп. і дата  
 Інв. № докл.  
 Взаєм. інв. №  
 Інв. № дубл.

## ДОДАТОК Б

### Порядок розрахунку збитків за типами надзвичайних ситуацій

Загальний обсяг збитків від наслідків НС розраховується як сума основних локальних збитків, грн:

$$З = Н_p + М_p + М_{п} + Р_{с/г} + М_{тв} + Р_{л/г} + Р_{р/г} + Р_{рек} + + А_{ф} + В_{ф} + З_{ф} + Р_{пзф} \quad (Б.1)$$

де  $Н_p$  — збитки від втрати життя та здоров'я населення, грн.;

$М_p$  — збитки від руйнування та пошкодження основних фондів, знищення майна та продукції, грн.;

$М_{п}$  — збитки від невироблення продукції через зупинку виробництва, грн.;

$Р_{с/г}$  — збитки від вилучення / порушення сільськогосподарських угідь, грн.;

$М_{тв}$  — збитки від втрат тваринництва, грн.;

$Р_{л/г}$  — збитки від втрати деревини та інших лісових ресурсів, грн.;

$Р_{р/г}$  — збитки від втрат рибного господарства, грн.;

$Р_{рек}$  — збитки від знищення або погіршення якості рекреаційних зон, грн.;

$А_{ф}$  — збитки від забруднення атмосферного повітря, грн.;

$В_{ф}$  — збитки від забруднення поверхневих і підземних вод та джерел, внутрішніх морських вод і територіального моря, грн.;

$З_{ф}$  — збитки від забруднення земель несільськогосподарського призначення, грн.;

$Р_{пзф}$  — збитки, заподіяні природно-заповідному фонду, грн.

Для кожного типу НС згідно з класифікатором НС встановлюється перелік основних характерних збитків щодо кожного рівня НС залежно від масштабів шкідливого впливу.

Основні типи НС визначені постановою Кабінету Міністрів України від 15 липня 1998 р. № 1099 (1099-98-п) «Про порядок класифікації надзвичайних ситуацій».

Підп. і дата	
Інв. № докл.	
Взаєм. інв. №	
Інв. № дубл.	
Підп. і дата	
Взаєм. інв. №	
Інв. № докл.	

Вил	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ЕК 19510242

Арк

79