



НАВЧАЛЬНИ
ВИДАННЯ

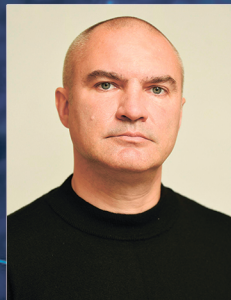
ШВОРОВ С.А., ОПРИШКО О.О.,
ЦИЦЮРСЬКИЙ Ю.Л. ЛАВІНСЬКИЙ Д.С.



ШВОРОВ СЕРГІЙ АНДРІЙОВИЧ
Професор кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка НУБіП України (<https://nubip.edu.ua/shvorov-serhiy-andriyovych>).
Фахівець з автоматики і робототехніки, наукові інтереси: інтелектуальні системи керування; роботизовані системи збору та переробки органічної сировини,



ОПРИШКО ОЛЕКСІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ
кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. академіка І.І. Мартиненка ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України (<https://nubip.edu.ua/opryshko-oleksiy-oleksandrovych>)
Фахівець з автоматики і робототехніки, наукові інтереси: дистанційний моніторинг, робототехнічні системи і комплекси



ЦИЦЮРСЬКИЙ ЮРІЙ ЛЕОНТІЙОВИЧ
асистент кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. академіка І.І. Мартиненка ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України (<https://nubip.edu.ua/tsytsyurskiy-yuriy-leontiyovych>)
Фахівець з автоматики і біотехнологій, наукові інтереси: робототехнічні системи і комплекси, автоматизація біотехнічних об'єктів



ЛАВІНСЬКИЙ ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ
завідувач лабораторіями кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка НУБіП України (<https://nubip.edu.ua/lavinskyi-dmytro-serhiyovych>).
Фахівець з автоматики і біотехнологій, наукові інтереси: робототехнічні системи і комплекси, автоматизація біотехнічних об'єктів

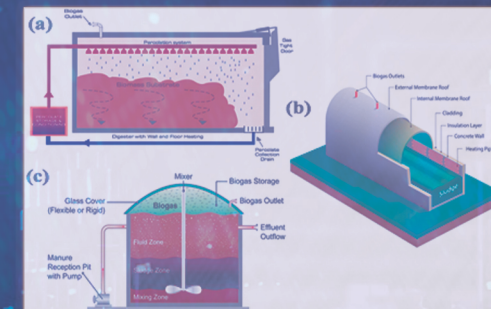
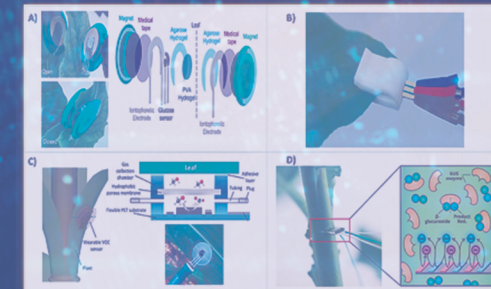
ЧАСТИНА 1

СВІТОВИЙ ДОСВІД АВТОМАТИЗАЦІЇ
СУЧАСНИХ ОБ'ЄКТІВ АГРАРНОГО
СПРЯМУВАННЯ

ШВОРОВ С.А.,
ОПРИШКО О.О.,
ЦИЦЮРСЬКИЙ Ю.Л.,
ЛАВІНСЬКИЙ Д.С.

СВІТОВИЙ ДОСВІД АВТОМАТИЗАЦІЇ СУЧАСНИХ ОБ'ЄКТІВ АГРАРНОГО СПРЯМУВАННЯ ЧАСТИНА 1

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



КИЇВ 2025



**НАВЧАЛЬНІ
ВИДАННЯ**

Шворов С.А., Опришко О.О., Цицюрський Ю.Л. Лавінський Д.С.

**Світовий досвід автоматизації
сучасних об'єктів аграрного
спрямування. Частина 1
Навчальний посібник**



**НАВЧАЛЬНІ
ВИДАННЯ**

Шворов С.А., Опришко О.О., Цицюрський Ю.Л. Лавінський Д.С.

Світовий досвід автоматизації сучасних об'єктів аграрного спрямування. Частина 1

Навчальний посібник

Київ

2025

УДК: 631.3(100):681.5

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради

Національного університету біоресурсів та природокористування України

(протокол № 4 від 22 жовтня 2025 р.)

Рецензенти:

Камінський В.Ф., академік-секретар відділення землеробства, меліорації та механізації Національної академії аграрних наук, доктор сільськогосподарських наук, академік НААН;

Самохвалов Ю.Я., доктор технічних наук, професор (Київський національний університету імені Тараса Шевченка);

Грудинін Б.О., доктор педагогічних наук, доцент (Національний університет біоресурсів та природокористування України, м.Київ)

Світовий досвід автоматизації сучасних об'єктів аграрного спрямування.

Частина 1: навчальний посібник / С.А.Шворов, О.О.Опришко, Ю.Л.Цицюрський, Д.С.Лавінський – Київ : НУБіП України, 2025. - 249 с.

ISBN 978-617-8718-60-2

Такий посібник може стати у пригоді студентам та аспірантам аграрних і технічних спеціальностей, викладачам і науковцям, які працюють у сфері біоенергетики, птахівництва та тепличного виробництва, а також практикам аграрного сектору й інженерам, що займаються автоматизацією та розробкою сучасних систем моніторингу. Він буде корисним як для навчання і досліджень, так і для впровадження інноваційних технологій у виробництво..



Шворов Сергій Андрійович

доктор технічних наук, професор кафедри автоматки та робототехнічних систем ім. академіка І.І.Мартиненка ННІ енергетики, автоматки і енергозбереження НУБіП України

Фахівець з автоматки і робототехніки, виробництва біогазу.

наукові інтереси: виробництво біогазу, системи прийняття рішень, робототехнічні системи і комплекси

Опришко Олексій Олександрович,



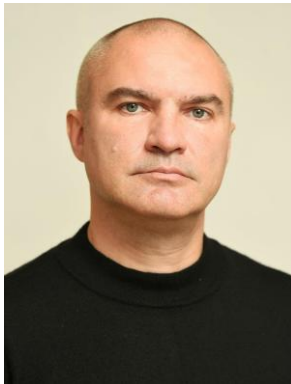
кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри автоматки та робототехнічних систем ім. академіка І.І.Мартиненка ННІ енергетики, автоматки і енергозбереження НУБіП України

(<https://old.nubip.edu.ua/node/2097>)

Фахівець з автоматки і робототехніки,

наукові інтереси: дистанційний моніторинг, робототехнічні системи і комплекси

Цицюрський Юрій Леонтійович,



майстер виробничого навчання кафедри автоматки та робототехнічних систем ім. академіка І.І. Мартиненка ННІ енергетики, автоматки і енергозбереження НУБіП України

(<https://old.nubip.edu.ua/node/79404>)

Фахівець з автоматки і біотехнологій,

наукові інтереси: робототехнічні системи і комплекси, автоматизація біотехнічних об'єктів

Лавінський Дмитро Сергійович



завідувач лабораторіями кафедри автоматки та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка НУБіП України

(<https://old.nubip.edu.ua/node/79402>)

Фахівець з систем, автоматки та робототехніки,

наукові інтереси: дослідження та створення роботизованих комплексів, автоматизація в енергетиці, мікроклімат, відновлювальні джерела енергії.

ЗМІСТ

	Передмова	6
Тема 1	Роль біоенергетики та актуальність досліджень потенціалу виробництва біогазу	7
1.2	Новітні технології виробництва біогазу: критичний огляд нещодавнього прогресу, викликів та майбутніх перспектив	17
Тема 2.	Покращення біогазу за допомогою процесів адсорбції: математичне моделювання, симуляційний та оптимізаційний підхід	45
2.2	Розділення твердої та рідкої фази дигестату з біогазових установок: систематичний огляд ефективності методів	72
2.3	Обробка даних: покращення розуміння використання біогазу за допомогою дистанційного зондування	84
	<i>Рекомендована література (біогазове виробництво)</i>	103
	<i>Питання для самоперевірки (біогазове виробництво)</i>	104
Тема 3	Світовий досвід автоматизації технологічних процесів і виробництв у промисловому птахівництві. Робототехніка для птахівництва: виклики та можливості	105
3.2	Огляд прогресу та тенденцій безконтактних методів виявлення інформації про ріст птиці	119
3.3	Дослідження параметрів мікроклімату пташника в зимовий період та вдосконалення системи автоматичного регулювання температури повітря	129
3.4	Система контролю вмісту аміаку в повітрі на агропромислових комплексах	135
3.5	Сучасний стан та напрями розвитку інкубаційного обладнання в галузі птахівництва	138
3.6	Вплив режиму освітлення на економічну ефективність птахівництва	147
3.7	Можливості застосування світлодіодного освітлення в птахівництві	150
	<i>Рекомендована література (пташники)</i>	152
	<i>Питання для самоперевірки (пташники)</i>	152
Тема 4.	Світовий досвід автоматизації технологічних процесів і виробництв в спорудах закритого ґрунту. Застосування рослинних фабрик зі штучним освітленням у садівництві: сучасний стан і перспективи розвитку	154
4.2	Системи охолодження теплиць: сучасні підходи, виклики та шляхи підвищення сталості	170
4.3	Технологія сенсорних датчиків для виробництва помідорів у теплицях: систематичний огляд	189

4.4	Останні досягнення у сфері носимих та імплантованих електрохімічних (біо)сенсорів для моніторингу стану здоров'я рослин	211
4.5	Інформаційно-вимірювальна система для дистанційного моніторингу параметрів мікроклімату	232
4.6	Автоматизація управління процесами вирощування культур у вертикальних тепличних комплексах	238
	<i>Рекомендована література (теплиці)</i>	247
	<i>Питання для самоперевірки (теплиці)</i>	248

Передмова

Сучасний розвиток аграрного сектору характеризується динамічним впровадженням інноваційних технологій, серед яких провідне місце посідає автоматизація виробничих процесів. Прагнення до підвищення продуктивності, раціонального використання ресурсів та мінімізації впливу на довкілля формує запит на системне вивчення і адаптацію світового досвіду у сфері автоматизації аграрних об'єктів.

Особливе значення в цьому контексті набуває застосування роботизованих систем у птахівництві, тепличних комплексах та на інших об'єктах аграрного виробництва. Використання робототехніки, у поєднанні з інтелектуальними системами управління, сенсорними технологіями та дистанційним моніторингом, дозволяє підвищити ефективність технологічних процесів, оптимізувати витрати ресурсів, покращити умови утримання тварин і рослин, а також сприяти сталому розвитку виробництва.

Вивчення світового досвіду є критично необхідним для забезпечення конкурентоспроможності та інноваційного розвитку аграрного сектору України. Аналіз міжнародних практик дозволяє не лише оцінити ефективність різних технологічних рішень, а й визначити найкращі підходи до їх адаптації в умовах національного виробництва. Такий підхід сприяє запобіганню помилок, оптимізації інвестицій, прискоренню впровадження новітніх технологій і підвищенню загальної ефективності агропромислового комплексу.

Запропонований посібник має на меті систематизацію наукових і практичних здобутків у галузі автоматизації та робототехніки, аналіз сучасних підходів і перспектив їхнього розвитку, а також формування комплексного бачення тенденцій технологічного прогресу в аграрній сфері. Його матеріали можуть слугувати навчально-методичною основою для студентів і аспірантів, а також практичним орієнтиром для фахівців агропромислового комплексу та інженерів-розробників.

Автори висловлюють сподівання, що видання стане корисним джерелом інформації для науковців, викладачів і практиків, сприятиме розвитку науково-освітнього потенціалу та підвищенню конкурентоспроможності аграрного виробництва на світовому ринку.

Посібник підготували д.т.н. проф. Шворов С.А (розділ 1-2), к.т.н. доцент
Опришко О.О. (розділ 3, 4.1-4.4), Цицюрський Ю.Л. (розділ 4.5), Лавінський Д.С.
(розділ 4.6).

1. РОЛЬ БІОЕНЕРГЕТИКИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОТЕНЦІАЛУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

1.1.1 Вступ. У багатьох країнах світу біоенергетика відіграє ключову роль у боротьбі зі зміною клімату, підвищенні енергетичної безпеки, а також у створенні нових робочих місць і сприянні місцевому розвитку. Заміна значних обсягів викопного палива на відновлювані джерела є пріоритетом найближчих десятиліть. Біоенергія розглядається як необхідне доповнення до таких відновлюваних джерел, як сонячна, вітрова та гідроенергетика.

Для виробництва тепла, палива для транспорту і промисловості, а також електроенергії використовують різноманітні види біомаси. Існують різні типи виробничих систем і біоенергетичних продуктів із різною екологічною та економічною ефективністю. Використання біомаси в енергетичних цілях може викликати суперечки, особливо коли йдеться про конкуренцію з виробництвом харчових продуктів або кормів. Проте досі існують великі обсяги біомаси низької вартості — зокрема, харчові відходи, сільськогосподарські рештки, гній, — які складно утилізувати або використовувати ефективно.

Такі види біомаси можна перетворювати не лише на енергію, а й на біомедичні препарати, хімічні речовини, нові матеріали (зокрема наноматеріали) та біопаливо. Одним із перспективних варіантів є виробництво біогазу — універсального джерела енергії та біодобрив, який може утворюватися з відходів, проміжних або покривних культур. Це дозволяє перетворити те, що раніше вважалося відходами, на відновлювану енергію та корисні поживні речовини.

Рішення на основі біогазових технологій мають потенціал створювати позитивні екологічні, економічні та соціальні ефекти. Особливої актуальності ці підходи набули в умовах геополітичної нестабільності, зокрема після початку повномасштабної війни Росії проти України, яка ще раз підкреслила критичну важливість енергетичної та продовольчої безпеки. У цьому контексті Європейська стратегія REPowerEU передбачає зростання виробництва біометану в ЄС у 12 разів до 2030 року (відносно рівня 2020 року).

Перехід до біоекономіки потребує достовірної інформації про те, скільки та яких видів біомаси може бути використано для енергетичних цілей у межах певного регіону. Для цього проводять дослідження потенціалу виробництва біоенергії, які широко застосовуються у процесі формування політик, планування інвестицій та прийняття рішень у суміжних галузях.

Наявні огляди свідчать про те, що методологічні підходи до таких досліджень дуже різняться, і це суттєво впливає на результати. Однак більшість наявних оглядів охоплюють загальні підходи до оцінки біоенергетичного потенціалу і часто не враховують особливості окремих видів біоенергії. Тому існує потреба в аналізі досліджень, присвячених саме біогазовому потенціалу, оскільки кожен вид біоенергії має свої специфічні чинники, які потрібно враховувати.

Проведений огляд досліджень потенціалу виробництва біогазу має на меті доповнити існуючі узагальнюючі дослідження і сприяти глибшому розумінню

того, як саме здійснюються ці оцінки. Робота також спрямована на аналіз можливих методологічних підходів, відповідності цілей досліджень широті застосування біогазових рішень, а також на оцінку прозорості та точності результатів, з урахуванням наявних невизначеностей.

Поставлені дослідницькі питання включають:

- Які загальні методологічні підходи використовуються у таких дослідженнях?
- Які типи потенціалу та чинники враховуються?
- Наскільки цілі й охоплення досліджень відповідають сучасному розумінню можливостей біогазових технологій?
- Чи є дослідження прозорими, точними та обґрунтованими?

Мета полягає в тому, щоб на основі отриманих результатів надати практичні рекомендації щодо проведення оцінки потенціалу виробництва біогазу, яка б могла сприяти ширшому впровадженню біогазових рішень.

1.1.2. Теоретичні засади

1.1.2.1. Дослідження потенціалу біоенергетики

Біоенергія отримується з біомаси, що походить від рослинного та тваринного походження. Історично біомасу переважно використовували для отримання тепла в печах, камінах та примітивних промислових установках. Згодом з'явилися новітні технології, що дозволяють перетворювати біомасу за допомогою біохімічних (наприклад, ферментація, анаеробне зброджування), фізико-хімічних (наприклад, естерифікація) та термохімічних (наприклад, піроліз) методів.

Такі технології дозволяють перетворювати біомасу на енергетичні продукти у газоподібній (біогаз, синтез-газ), рідкій (біоетанол, біодизель, біометан) або твердій (пелети) формі. Тому при оцінці біоенергетичного потенціалу важливо розуміти, які види біомаси доступні та в яких обсягах, а також які типи енергетичних продуктів та супутніх товарів можуть бути з них отримані.

Особливу увагу слід приділяти найбільш ефективному використанню кожного виду біомаси. Наприклад, концепція "екопіраміди" пропонує підхід до оцінки цінності та пріоритетності використання біоресурсів. У даному розділі основна увага зосереджена на дослідженнях потенціалу виробництва біометану, але також враховуються підходи, які охоплюють ширший контекст біопереробки.

Результати різних оглядів демонструють суттєві розбіжності в оцінках біоенергетичного потенціалу. Наприклад, у глобальному масштабі оцінки варіюються від кількох десятків до понад 1500 ексаджоулів на рік — у деяких випадках це навіть більше, ніж загальне світове споживання енергії. Така різниця зумовлена відмінностями в географії досліджень, доступності земель, типах біомаси, технічних та економічних чинниках, а також соціально-політичних особливостях і тимчасових горизонтах оцінки. Впливають також використані коефіцієнти урожайності культур та коефіцієнти конверсії. Часто при цьому ігноруються такі аспекти, як доступність води чи деградація земель.

1.1.2.2. Типи потенціалу та методичні підходи

Оцінки біоенергетичного потенціалу можуть охоплювати різні його типи. У науковій літературі запропоновано кілька класифікацій, які хоч і різняться термінами, але загалом можна виділити такі типи потенціалу:

- Теоретичний потенціал — максимальна кількість біомаси або біоенергії, яку можливо отримати в межах певної території.
- Соціальний або інституційний потенціал — частка потенціалу, прийнятна з точки зору суспільства та відповідає чинному регулюванню.
- Екологічний потенціал — рівень, при якому враховано екологічні обмеження, зокрема як позитивні, так і негативні наслідки виробництва біоенергії.
- Технічний потенціал — частина потенціалу, яка може бути реалізована за допомогою наявних технологій, з урахуванням можливого технічного прогресу.
- Економічний потенціал — обсяг біоенергії, який економічно доцільно виробляти.

Реалізаційний (ринковий або практичний) потенціал — частина потенціалу, яка реально може бути досягнута в межах певного періоду, з урахуванням усіх інших факторів.

Межі між цими категоріями не завжди чіткі, і вони можуть перетинатися. Наприклад, технічний потенціал може стосуватися як самих технологій переробки біомаси, так і ширшого контексту — наприклад, доступності земель для виробництва їжі, житла чи охорони природи.

Більшість досліджень потенціалу біоенергії умовно можна поділити на два типи: орієнтовані на попит (потреби ринку) і орієнтовані на ресурси (фактична доступність біомаси). Перші враховують стратегічні та соціальні цілі, другі — доступність сировини з урахуванням альтернативних способів її використання.

1.1.2.3. Біогазові рішення

Біогаз — це енергетичний продукт, який утворюється внаслідок анаеробного зброджування (тобто без доступу кисню), коли біомаса розкладається під дією бактерій та ферментів. У результаті цього процесу утворюються метан, вуглекислий газ та малі кількості інших газів, таких як сірководень або закис азоту.

Більшість видів органічної сировини підходять для виробництва біогазу: це гній, залишки врожаю, харчові відходи, осад стічних вод. Винятком є біомаса з високим вмістом лігніну (наприклад, деревина), який важко розкладається. У деяких випадках вирощуються спеціальні енергетичні культури для біогазу, однак така практика вважається суперечливою через ризики витіснення продовольчого виробництва.

Ефективність анаеробного зброджування залежить від умов: температури, рН, рівня аміаку. Виділяють кілька температурних режимів зброджування:

- психрофільний (4–25 °C),

- мезофільний (30–40 °С),
- термофільний (50–60 °С),
- екстремофільний (понад 70 °С).

Найпоширенішими є мезофільні та термофільні режими.

Окрім вибору температури, є й інші технологічні рішення, що підвищують ефективність: передобробка сировини (фізична, хімічна, біологічна), стерилізація (для знищення патогенів), спільне зброджування кількох видів сировини, використання нанобульбашок для покращення розкладу.

Сирий біогаз зазвичай містить 50–70 % метану та 20–45 % CO₂. Його можна використовувати безпосередньо для виробництва тепла чи електроенергії, або ж очищати (upgrading) для подальшого використання у мережах чи транспорті. Вуглекислий газ також можна використовувати в теплицях або харчовій промисловості.

Побічним продуктом є *дигестат* (digestate) — залишкова маса, що містить поживні речовини. Його можна використовувати як добриво, а також додатково обробляти для отримання біочару, поверхнево-активних речовин або вогнестійких матеріалів.

1.1.3. Методологія

Огляд літератури розпочався з пошуку публікацій у двох авторитетних наукових базах даних: Web of Science (WOS) Core Collection та SCOPUS. Їх було обрано з огляду на широкий охоплення наукових журналів, зокрема у галузі технічних наук та інженерії. Для пошуку використовувалися ключові слова: “biogas potential” у поєднанні з *evaluat**, *analys**, *estimat**, *assess**. Пошук здійснювався за назвою, анотацією та ключовими словами публікацій.

Загалом було знайдено 686 статей. Далі проводилось фільтрування за низкою критеріїв. Основним критерієм для включення була наявність у дослідженні географічної прив'язки – національного рівня, субнаціональних регіонів (наприклад, провінцій або штатів) чи муніципалітетів. Статті, у яких потенціал біогазу визначався лише за результатами лабораторних експериментів із конкретними зразками біомаси, було виключено. Водночас були включені роботи, що розглядали потенціал біогазу у межах ширших досліджень з біоенергетики, навіть якщо вони охоплювали інші енергетичні ресурси.

До аналізу не потрапили тези конференцій, розділи книг і публікації, написані не англійською мовою. У процесі відбору також усувалися дублікати та недоступні статті. На початковому етапі проведено обмежений огляд 10 статей, що дозволило визначити основні теми для подальшого аналізу. Для багатьох тем аналіз стосувався не лише способу проведення досліджень, а й включав критичну оцінку впливу різних підходів на релевантність, точність, прозорість і практичну цінність таких досліджень потенціалу.

1.1.4. Результати

У цьому розділі представлено результати огляду, а також коротке підсумування наприкінці.

1.1.4.1. Заявлені цілі досліджень

Більшість досліджень були спрямовані на оцінку кількості доступної біомаси в різних видах сировини та відповідного біогазового потенціалу. Біогазовий потенціал зазвичай виражався в обсягах газу або у вигляді енергетичного еквівалента. У багатьох випадках у формулюванні мети вказувалася сфера дослідження, наприклад, зосередження на певному географічному регіоні, типі сировини, технологіях або часовому періоді.

Деякі роботи також мали за мету оцінити, якою мірою впровадження біогазових систем може сприяти зменшенню викидів парникових газів. Окремі дослідження ставили за мету вдосконалення методології оцінки потенціалу біоенергії. Також зустрічалися дослідження, які декларували підтримку процесу ухвалення рішень для політиків і зацікавлених сторін.

1.1.4.2. Географічний масштаб і рівні деталізації

Щодо географічного охоплення, домінували дослідження, виконані для країн Азії (43 роботи) та Європи (31 робота). У регіонах Америки було проведено 13 досліджень, а в Африці — 10. Такий розподіл можна пояснити ширшим впровадженням біогазових технологій в Азії та Європі порівняно з іншими континентами.

На континентальному рівні було виявлено три роботи: дві з оцінкою біогазового потенціалу в Європі (з використанням відходів пивоваріння та гною) та одну для Латинської Америки (на основі гною молочних корів).

Національний рівень дослідження був представлений у 25 роботах, регіональний — у 19. У 21 роботі поєднувалися національний і регіональний рівні, де дані з регіонів агрегувалися до загального національного потенціалу. У 8 дослідженнях збиралися локальні дані, які потім узагальнювалися до регіонального рівня, а в окремих випадках — до національного. Ще два дослідження охоплювали регіональний і мікрорівень, а одне — національний, регіональний та мікрорівні одночасно. Дев'ять досліджень були зосереджені лише на локальному рівні, а п'ять — лише на мікрорівні.

1.1.4.3. Типи потенціалу

В оглянутих роботах було виявлено нечіткість та варіативність у визначенні типів біогазового потенціалу та термінів, що для цього використовуються. У 49 дослідженнях не вказувалося, який саме тип потенціалу оцінювався, тоді як у 48 — тип було визначено. У 20 роботах фігурував термін «теоретичний потенціал». Проте його значення не завжди відповідало загальноприйнятому — іноді воно трактувалося як потенціал, що відрізняється від наявного або такого, що може бути реалізований.

У деяких дослідженнях при оцінці «теоретичного потенціалу» враховувалися технічні, правові та ринкові обмеження. Окремі роботи згадували інші типи потенціалу, як-от техніко-економічний, іноді під іншими назвами (наприклад, «відновлюваний» замість «технічний»). У низці досліджень вводилися нові терміни, зокрема «сталий потенціал», який враховував екологічні, соціальні та економічні чинники.

Незалежно від термінології, у більшості досліджень прагнули наблизитися до реалістичної оцінки. Один із підходів полягав у застосуванні до теоретичного потенціалу коригувальних коефіцієнтів, пов'язаних з технічними чи економічними обмеженнями. Такий підхід було застосовано в 15 роботах, де після розрахунку теоретичного потенціалу проводилося уточнення до технічного, економічного або практичного рівнів. В одній з робіт було послідовно оцінено теоретичний, технічний та економічний потенціал, де чітко простежувалося зменшення величини з урахуванням додаткових факторів.

1.1.4.4. Сировинні ресурси

Тип біомаси, яку використовують у біогазових системах, зазвичай залежить від наявних сільськогосподарських практик та промисловості в регіоні.

У загальній кількості 67 досліджень було оцінено потенціал виробництва біогазу з гною. Здебільшого гній класифікувався за видом тварин — найчастіше розглядали велику рогату худобу, овець, кіз, свиней та птицю. Рідше згадували верблюдів, віслюків, буйволів і коней.

Також часто вивчали можливості отримання біогазу з рослинних решток — тобто нехарчових та некормових частин культур. Тип і форма цих залишків залежали від вирощуваних культур: зазвичай це зернові (пшениця, ячмінь), які утворюють соломку або стебла, а також рис, що дає лушпиння та соломку. Часто включався й кукурудзяний матеріал — як повноцінна енергетична культура або як залишки після збирання врожаю.

Лише поодинокі дослідження оцінювали повноцінні культури, крім кукурудзи — наприклад, сорго, цукрові буряки та тритикале. Деякі роботи також розглядали доцільність вирощування конюшини, злакових трав, проміжних або покривних культур для біогазового виробництва.

У частині досліджень як основу для оцінки потенціалу використовували сівозмінні системи, що краще відповідає реальним аграрним умовам і має позитивний вплив на сталість сільського господарства.

Близько третини досліджень (31) включали тверді побутові відходи (ТПВ), у яких біогазові технології можуть сприяти як отриманню енергії, так і ефективнішому управлінню відходами й поверненню поживних речовин. Зокрема, використовувалась органічна фракція ТПВ, що містить переважно харчові відходи з домогосподарств, ресторанів, магазинів тощо.

Окремо 16 досліджень вивчали потенціал біогазу зі стічних мулів, зазвичай з муніципальних очисних споруд.

У 35 дослідженнях розглянуто біогазовий потенціал промислових відходів і стічних вод. Основу становили непридатні для споживання залишки рослинної чи тваринної продукції (олійне насіння, м'ясо, молоко тощо). Промислові стоки харчової галузі, що містять органічну речовину, вважаються важливою сировиною. Найчастіше досліджували біогазовий потенціал підприємств м'ясопереробки, виробництва алкоголю (пивоваріння, виноробство), цукроваріння та молочних заводів. Рідше згадували галузі целюлозно-паперової промисловості, переробки кави, фруктів, овочів і риби.

1.1.4.5. Вихідні дані та підходи до оцінювання потенціалу

Оцінку потенціалу біогазу в більшості випадків починали з офіційної статистики — наприклад, національних переписів чи баз даних FAOSTAT. Дослідження гною часто ґрунтувалися на чисельності тварин у регіоні, обсягах гною, який утворюється щороку, і частці, яку можна зібрати (враховуючи, наприклад, кількість часу, проведеного тваринами в стійлах).

У випадку з побутовими відходами вихідною інформацією зазвичай слугувала чисельність населення, далі — середній обсяг відходів на особу та частка, яка реально збирається.

Оцінювання залишків сільгоспкультур іноді починали з наявної площі сільськогосподарських угідь, потім враховували врожайність і співвідношення між основною продукцією та залишками. Значно рідше відштовхувалися від реальних обсягів уже зібраної біомаси — ймовірно, через відсутність таких даних у статистичних джерелах.

1.1.4.6. Коефіцієнти перетворення

Для коректної оцінки потенціалу необхідно знати не лише обсяги біомаси, а й її характеристики — тобто яка частка може бути перетворена в біогаз.

Найчастіше використовувався коефіцієнт специфічного біохімічного потенціалу метану (sBMP), що показує обсяг біометану (у нормальних м³), який можна отримати шляхом анаеробного зброджування 1 г летких речовин (VS) у сировині. Ці коефіцієнти зазвичай визначаються експериментально в лабораторіях, але можуть також походити з дослідно-промислових або діючих біогазових установок.

Одиниця вимірювання sBMP найчастіше — об'єм біогазу на масу летких речовин (Nm³/кг VS), хоча іноді використовували перерахунок на суху речовину (DM) або хімічне споживання кисню (COD). У деяких випадках оцінювали навіть безпосередній перехід від маси біомаси до обсягу біогазу або до отриманої енергії (електрики чи тепла), мінаючи проміжні параметри.

У більшості досліджень використовувалися дані з літератури. У разі досліджень із рідкісними видами сировини — проводилися власні лабораторні експерименти. Наприклад, Сенол у 2021 році проводив аналіз лушпиння фундука для оцінки потенціалу біогазу в регіоні Гіресун (Туреччина).

У кількох роботах також застосовували стехіометричні розрахунки за рівнянням Басвелла. Для цього потрібно знати склад сировини за вмістом С, Н, О, N, які в процесі перетворюються на CO₂, CH₄ та NH₃. Такий підхід дозволяє розрахувати теоретичний максимум, проте на практиці біогазові установки досягають нижчого рівня перетворення.

1.1.4.7. Продукція та напрями використання

Більшість досліджень орієнтовані на отримання енергії, зокрема виробництво біогазу для генерації електрики та тепла. Деякі роботи оцінювали обсяг і енергетичну цінність саме біометану, але питання модернізації біогазу до біометану не завжди детально розглядалося.

Хоча біогазові технології можуть відігравати важливу роль у замкнутому циклі живлення культур, більшість досліджень ігнорували побічний продукт зброджування — дигестат. Лише 33 дослідження визнавали його роль у поверненні поживних речовин, і лише 16 оцінювали його кількість або вміст азоту, фосфору й калію. В окремих випадках визначали навіть площу, необхідну для внесення дигестату, хоча це іноді трактувалося як проблема утилізації, а не як потенційний ресурс.

Загалом навіть ті дослідження, що розглядали біометан, рідко акцентували на вуглекислому газі, який утворюється при модернізації. У сучасних умовах, коли активно розвиваються технології уловлювання та використання CO₂ (CCS, CCU), біогазові установки, що вже виділяють концентрований CO₂ після модернізації, можуть бути ефективними платформами для таких рішень.

1.1.4.8. Метод оцінки

У більшості досліджень оцінка потенціалу виробництва біогазу розпочиналася зі створення інвентаризації біомаси з подальшим використанням її характеристик і коефіцієнтів перетворення. Такий підхід називають лінійним підходом, що базується на інвентаризації. Часто його доповнювали просторовим аналізом і картографуванням (наприклад, з використанням ГІС), що дозволяло візуалізувати розподіл сировини. Інформація про просторовий розподіл є особливо важливою для визначення місця розміщення біогазових установок і оптимізації логістики транспортування.

Окремі дослідження використовували складніші моделі, зокрема прогнозу модель на базі тваринницьких даних (АВЕРЕ), моделювання системної динаміки, процесно-орієнтовану модель підтримки агротехнологічних рішень, моделі на основі ланцюгів Маркова, математичне моделювання, регресійний аналіз, ГІС-моделі з багатокритеріальною оцінкою, а також статистичне зниження масштабу та калібрування даних щодо доступності біомаси.

1.1.4.9. Управління невизначеністю

Дослідження потенціалу біогазу зазвичай передбачають спрощення та припущення, які пов'язані з різними видами невизначеності. Попри це, більшість робіт не застосовували системного підходу до управління невизначеністю та не обговорювали її вплив на результати. Основна увага приділялася лише кінцевим обсягам біомаси або біогазу, без аналізу впливу припущень чи варіантів розрахунків.

Деякі дослідження все ж використовували сценарний підхід, коли потенціал оцінювався за умов різних технічних і соціально-економічних сценаріїв, з урахуванням можливих змін у політиці. В окремих роботах застосовували метод Монте-Карло для моделювання впливу змінних на результати, що дозволяло кількісно оцінити рівень невизначеності.

1.1.4.10. Часовий аспект

Багато досліджень орієнтувалися на поточний потенціал, базуючись на наявних даних щодо сировини. Проте в деяких випадках доводилося використовувати застарілі дані (до 10 років давності), особливо у країнах, де

переписи не проводяться щорічно. Часто старі дані не коригували, але іноді застосовували лінійну екстраполяцію для оцінки поточного стану. Цей метод також використовувався для прогнозів на майбутнє, з урахуванням можливих змін у демографії, сільському господарстві чи промисловості.

У 20 роботах було здійснено оцінку майбутнього потенціалу, найчастіше на період 2020–2040 років. Одне з досліджень оцінювало потенціал біогазу на 2025 і 2100 роки, базуючись на тенденціях 2010–2020 років.

1.1.4.11. Технологічний розвиток

Хоча вдосконалення технологій є ключовим чинником для підвищення ефективності виробництва біогазу, лише дев'ять досліджень з двадцяти, які стосувалися майбутнього потенціалу, враховували технологічний розвиток. Йдеться, зокрема, про вдосконалення попередньої обробки біомаси, впровадження нових схем сівозмін або коферментацію.

Лише шість досліджень розглядали коферментацію, використовуючи дані лабораторних експериментів або вторинні дані. Декілька робіт враховували використання нових типів реакторів, таких як анаеробні реактори з піднімальним шаром мулу (UASB) або сухе зброджування. Також відзначено використання технологій зневоднення осаду або нових методів екстракції органічної речовини.

1.1.5. Обговорення

Під час проведення огляду було виявлено кілька обмежень, головним чином пов'язаних з пошуком інформації. Зокрема, слово "potential" (потенціал) широко використовується в різних контекстах, через що багато публікацій містять терміни "біогаз" і "потенціал" у назвах, анотаціях або ключових словах, проте не мають відношення до дослідження потенціалу в географічному аспекті. З цієї причини для аналізу було обрано лише ті роботи, де прямо використовується словосполучення "biogas potential". Попри це, значна частина відібраних на першому етапі статей була виключена, оскільки стосувалася лише лабораторних експериментів з визначення питомого біогазового виходу.

Хоча обрана вибірка є репрезентативною, деякі впливові публікації, відомі авторам, не були включені до аналізу, щоб уникнути упередженості. Водночас ці праці були використані на етапі інтерпретації результатів для порівняння та глибшого розуміння загальних тенденцій у сфері оцінювання біогазового потенціалу. В результаті було сформульовано рекомендації щодо покращення методичної обґрунтованості й достовірності подібних досліджень у майбутньому.

1.1.5.1 Необхідність структурованого підходу

Загалом, огляд свідчить про потребу в посиленні наукової строгості та структурованості підходів до оцінювання потенціалу біогазу. На жаль, багато досліджень демонструють фрагментарний підхід без чіткого обґрунтування вибору методів і часто не відповідають заявленим цілям. Наприклад, дослідження, спрямовані на аналіз майбутнього потенціалу, нерідко не враховують технологічні інновації або навіть новітні доступні рішення, хоча це мало б стати невід'ємною частиною прогностичної оцінки.

1.1.5.2 Узгодженість цілей, методів і припущень

Методологічні підходи мають виходити з мети дослідження та обраного типу потенціалу (теоретичний, технічний, економічний тощо). На практиці ж у більшості випадків відсутній зв'язок між метою, типом оцінюваного потенціалу та методикою. Наприклад, поширений підхід, який ґрунтується на статистичних даних про біомасу та питомих виходах біогазу з літератури, зазвичай використовується автоматично, без розгляду альтернатив. Такий лінійний підхід може бути доцільним для теоретичних оцінок у довгостроковій перспективі, проте для короткострокових прогнозів із практичними обмеженнями більш доречними є моделі системної динаміки або сценарні прогнози.

1.1.5.3 Конверсія біомаси та практичні обмеження

Переважає більшість досліджень використовує питомі виходи біогазу з лабораторних дослідів для розрахунків. Однак ці значення часто не відповідають виходам у реальних установках через інші умови ферментації, втрати під час збору та транспортування біомаси, а також технологічні особливості повномасштабного виробництва. Крім того, в практиці часто використовується коферментація, яка дає інший результат, ніж сума виходів від моноферментації кожного субстрату окремо. Таким чином, використання лише лабораторних даних може суттєво занижувати або завищувати реальний потенціал.

1.1.5.4 Типи біомаси – прогалини в дослідженнях

Неочікуваним результатом огляду стало виявлення майже повної відсутності досліджень, які включають морську біомасу (наприклад, водорості), або залишки лісової промисловості. Ці види біомаси мають значний потенціал, проте залишаються недостатньо дослідженими. Те саме стосується проміжних культур або багаторічних трав, які можуть стати важливим джерелом біомаси в найближчому майбутньому та сприяти переходу до більш сталого сільського господарства.

1.1.5.5 Багатофункціональність біогазових систем

Більшість проаналізованих досліджень орієнтовані винятково на енергетичний компонент — біогаз або біометан. Проте біогазові системи також забезпечують виробництво добрив (дигестату) та мають потенціал у вловлюванні та повторному використанні вуглекислого газу. Врахування усіх трьох продуктів (біометан, біодобриво, CO₂) дозволило б створити повнішу та реалістичнішу картину потенціалу біогазових технологій.

1.1.5.6 Управління невизначеністю

Більшість досліджень або ігнорують питання невизначеності, або не надають належної уваги цьому аспекту. Рекомендовано ширше використовувати аналіз чутливості та прості методи управління невизначеністю — наприклад, розрахунок потенціалу у вигляді інтервалів. Це дозволить виявити критичні параметри, які мають найбільший вплив на результат, і зосередити зусилля на їх уточненні.

1.1.5.7 Важливість участі зацікавлених сторін

У дослідженнях, присвячених оцінці потенціалу на місцевому або регіональному рівні, доцільним є застосування підходу "знизу вгору", із

залученням усіх ключових учасників процесу — фермерів, операторів біогазових установок, науковців, консультантів, представників місцевої влади та бізнесу. Такий підхід сприяє підвищенню достовірності оцінок, стимулює обмін знаннями й сприяє втіленню рішень на практиці.

1.2 НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ: КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД НЕЩОДАВНЬОГО ПРОГРЕСУ, ВИКЛИКІВ ТА МАЙБУТНІХ ПЕРСПЕКТИВ

Одним із ефективних способів зменшення викидів вуглекислого газу — одного з основних парникових газів — є скорочення споживання викопного палива за рахунок переходу на відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Серед головних екологічних викликів сьогодення — глобальні кліматичні зміни, забруднення пластиком, накопичення пестицидів та органічних відходів. У цих умовах ВДЕ стали необхідною та перспективною складовою енергетичної системи.

У світі спостерігається стрімке зростання розвитку ВДЕ, при цьому вартість їх впровадження суттєво знижується. Це зумовлює пріоритетність розвитку таких джерел енергії в більшості країн. До найбільш поширених ВДЕ належать гідро-, вітрова та сонячна енергія, а також геотермальна енергія та біомаса. Станом на сьогодні їх частка у глобальному енергетичному балансі становить близько 28 %.

У контексті європейської кліматичної політики особлива увага приділяється розвитку біогазових установок як джерела чистої енергії. Біогаз має здатність до секвестрації CO₂, тим самим сприяючи покращенню якості повітря. Анаеробне зброджування (АЗ) дає змогу використовувати біогаз для виробництва електроенергії, тепла або як моторне паливо, що має додаткові екологічні, економічні та кліматичні переваги.

Типовий склад біогазу після АЗ включає 55–70 % метану та 30–45 % вуглекислого газу, а також незначні домішки водню, сірководню, кисню та інших слідів вуглеводнів. Особливо важливим з екологічного погляду є отримання біогазу з сільськогосподарських та тваринницьких біовідходів, що дозволяє ефективно виробляти електроенергію з вторинної сировини.

Найбільшими виробниками біогазу у світі на сьогодні є США, Німеччина та Китай. Згідно з планом REPowerEU, у країнах ЄС планується досягти щорічного виробництва біогазу на рівні 35 млрд м³, тоді як наразі виробляється близько 3 млрд м³ біометану та 15 млрд м³ біогазу.

Енергетичну цінність біогазу можна значно підвищити за рахунок процесів очищення та апгрейду, що передбачають видалення CO₂ і підвищення концентрації метану. Сучасні дослідження пропонують різні технології апгрейду, зокрема криогенне розділення, хімічне поглинання та біоконверсійні процеси. Водночас їх основним недоліком є висока вартість обладнання та експлуатації.

У цьому розділі посібника розглянуто ключові напрями розвитку біогазових технологій. Основну увагу приділено сучасним підходам до виробництва, підготовки сировини та підвищення якості біогазу. Окремо проаналізовано фізико-хімічні, біохімічні та нанотехнологічні методи апгрейду. Розглянуто основні типи сировини для отримання біогазу, зокрема біомасу та органічні відходи, а також наведено їх порівняльну характеристику.

Оскільки домінуючою технологією біогазового виробництва залишається анаеробне зброджування, у посібнику також узагальнено типи реакторів та основні експлуатаційні параметри. Підсумовуючи, представлено сучасні приклади використання біогазу, його роль у світовій енергетиці, а також перспективи подальшого розвитку цієї галузі. Виробництво енергії з біомаси та біовідходів є критично важливим для досягнення вуглецево-нейтральної економіки завдяки низькій собівартості, можливості використання у віддалених районах та зменшенню залежності від викопного палива.

1.2.2. Джерела для виробництва біогазу

На глобальному рівні політика у сфері клімату та енергетики, а також активне впровадження відновлюваних джерел енергії стимулюють дослідження і розширення потужностей для виробництва біогазу. Це обумовлено зростанням цін на традиційні енергоносії, вичерпанням запасів викопного палива, нестабільністю постачання та недовірою до ринків енергоресурсів.

Біомаса, як альтернативне джерело енергії, має потенціал для вирішення екологічних проблем, пов'язаних з надмірною експлуатацією природних ресурсів та забрудненням довкілля. Під біомасою зазвичай розуміють велику групу різноманітних органічних матеріалів, що мають спільну рису — органічне походження. Її можна класифікувати за походженням: деревна і сільськогосподарська (залишки культур, дерева, енергетичні культури, стебла), промислові відходи, біомаса морського походження (очерет, водорості, гіацинт), відходи тваринництва, пташиний послід, а також органічні відходи водного походження.

Будь-яка біомаса, до складу якої входять білки, вуглеводи, жири, геміцелюлоза і целюлоза, може бути використана як сировина в процесі виробництва біогазу. Вихід метану (CH_4) і склад біогазу залежать від типу сировини, системи перетравлення та часу утримання, тому важливо оптимізувати ці параметри. Основні типи сировини наведено на **рис. 1.2.1**.



Рис. 1.2.1 Різні види сировини, які можна використовувати для виробництва біогазу як відновлюваного джерела енергії.

1.2.2.1. Харчові відходи як сировина

Однією з глобальних проблем є зростаюча кількість харчових відходів, викликана зростанням попиту на харчові продукти через збільшення населення. Щороку близько 1,3 мільярда тонн харчових продуктів вважаються відходами. Основними джерелами є домогосподарства, ресторани, супермаркети, їдальні підприємств та заклади харчування.

Харчові відходи здебільшого складаються з органічних речовин, зокрема вуглеводів, білків і ліпідів, що розкладаються до жирних кислот, глюкози, амінокислот тощо. Упродовж останніх років анаеробне зброджування стало основним методом переробки цих відходів та виробництва біогазу. У порівнянні з іншими методами, такими як газифікація, піроліз або спалювання, анаеробне зброджування є більш екологічним і не створює значного повітряного та твердого забруднення.

1.2.2.2. Промислові відходи

Різні промислові галузі, що переробляють сировину, продукують велику кількість відходів і побічних продуктів, які можуть бути використані для виробництва біогазу. Проте до складу таких відходів можуть входити патогени, домішки або важкі метали, що залежать від технологічного процесу і можуть впливати на стабільність процесу анаеробного зброджування. Зокрема, застосування дигестату як добрива може викликати ризики для здоров'я людей та тварин, а також спричинити забруднення довкілля.

У багатьох країнах уже діють екологічні норми, що обмежують використання певних видів промислових відходів. Серед основних джерел — відходи текстильної, нафтохімічної, целюлозно-паперової та агропереробної промисловості. Зокрема, для агропромислових відходів враховуються їхні хімічні, фізичні та термічні властивості.

На ефективність процесу збродження промислових відходів впливають тип сировини, рН, органічне навантаження та температура. У дослідженнях 2022 року, зокрема Кіані, було показано, що продуктивність біореактора зросла при застосуванні двоступеневого збродження та високому навантаженні (30 кг ХСК/м³·день), що дозволило досягти виходу метану на рівні 0,329 л СН₄/кг ХСК при ефективності вилучення понад 80%.

Целюлозно-паперова промисловість також продукує великі обсяги відходів — мул, золу, вапняний шлам. Такі відходи можуть бути використані у виробництві біогідрогену, біогазу, біовугілля, а також у біоенергетиці, виготовленні сорбентів, цементу та навіть як сировина для біопереробних підприємств.

Останніми роками зростає інтерес до виробництва біогідрогену, як до сталої альтернативи. Процес базується на темному анаеробному збродженні без використання світла, у ході якого відбувається розщеплення складних вуглеводів з утворенням водню (Н₂). Цей процес супроводжується виділенням водяної пари, що робить його екологічно чистим способом виробництва енергії.

1.2.2.3. Активний мул із установок очистки стічних вод

Відходи активного мулу утворюються у великих обсягах внаслідок використання процесу активованого мулу на очисних спорудах. У Європі у 2020 році було вироблено близько 9 мільйонів тонн таких відходів. Основним виробником була Німеччина — 1,8 мільйона тонн, за нею слідували Іспанія та Франція — по 1,2 мільйона тонн відповідно.

Оскільки активний мул містить значну кількість органічної речовини, його можна ефективно використовувати як сировину для виробництва біогазу. З однієї тонни мулу можливо отримати в середньому 120 м³ біогазу. Подальша оптимізація процесу анаеробного збродження, зокрема підвищення виходу метану (СН₄), дозволяє значно підвищити енергетичну ефективність цього джерела. Схема виробництва біогазу з очисних споруд зображена на рис. 1.2.2.

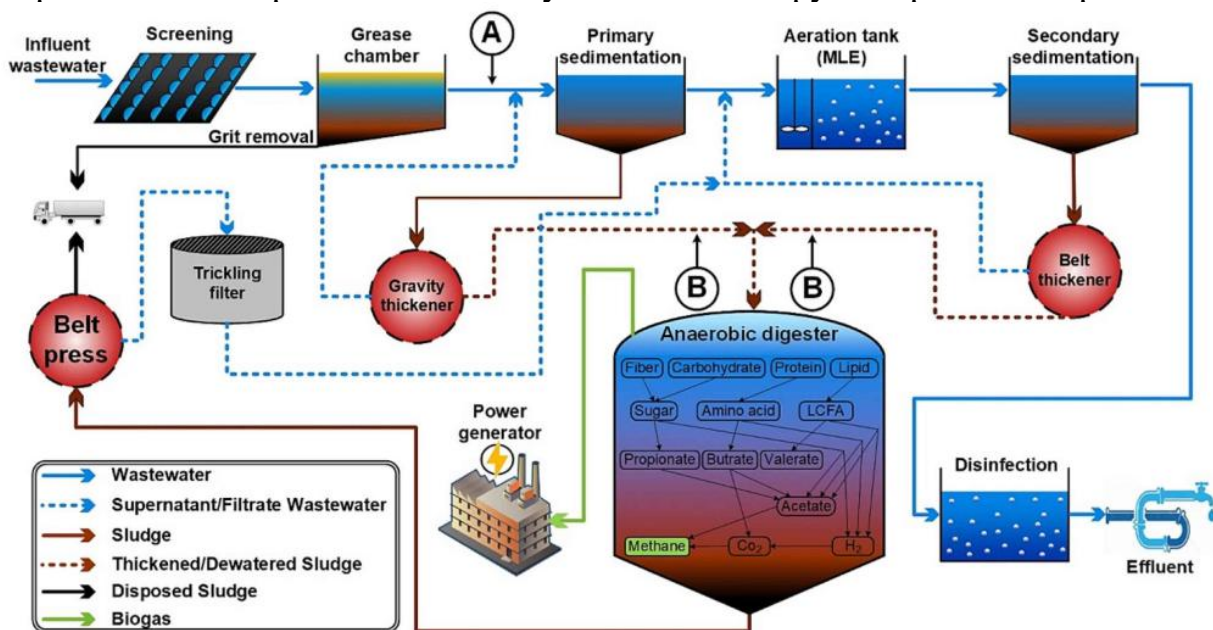


Рис. 1.2.2 Схема процесу виробництва біогазу з очисних споруд за допомогою АЗ-процесу

Отриманий біогаз може задовольняти енергетичні потреби самих очисних споруд або бути використаний у наявних мережах для виробництва тепла та електроенергії. Сьогодні ведуться численні дослідження щодо підвищення ефективності виробництва біогазу з активного мулу. Зокрема, вивчаються різні методи передобробки: ультразвукова обробка, ензимна та термічна обробка, використання природних цеолітів тощо.

1.2.2.4. Харчові відходи та органічні побутові відходи

До основних компонентів твердих побутових відходів належать харчові рештки та органічні побутові відходи, що формуються внаслідок комерційної, медичної, торговельної діяльності, а також у домогосподарствах. Таке сміття містить в середньому 46% харчових решток, 17% паперу, 10% пластику та 27% інших відходів.

Анаеробне зброджування є одним із найпоширеніших методів переробки харчових біовідходів для одержання біогазу. Спільне зброджування з іншими видами сировини, зокрема з лігноцелюлозними залишками чи відходами м'ясопереробки, дозволяє суттєво підвищити вихід біогазу. Крім того, застосування методів передобробки дає змогу збільшити виробництво метану в процесі зброджування.

Обсяг утворення твердих побутових відходів у світі вже перевищив 1,7 мільярда тонн на рік, і ця цифра постійно зростає внаслідок зростання населення. При неефективному управлінні такі відходи становлять серйозну загрозу для здоров'я людей і довкілля (забруднення ґрунтів, води, повітря). Тому пріоритетним напрямом стало використання органічної частини ТПВ як сировини для біоенергетики з дотриманням принципів сталого розвитку та економічної ефективності.

1.2.2.5. Гній великої рогатої худоби як сировина

Гній тварин містить велику кількість органічної речовини, що робить його цінним джерелом для виробництва біоенергії. У країнах ЄС (разом з Великобританією) щорічно виробляється до 1,4 мільярда тонн гною. Водночас лише незначна частина цього біовідходу збирається для подальшого використання.

Органічні відходи рослинного, тваринного та людського походження добре підходять для процесу анаеробного зброджування. Серед них — кормові та солом'яні залишки, гній, побутові відходи. Використання гною для виробництва біогазу має низку переваг: зниження впливу на довкілля, покращення санітарного стану територій, заміщення викопного палива.

З метою підвищення ефективності біогазових процесів проводиться багато досліджень щодо обробки гною. Наприклад, було встановлено, що лужна передобробка позитивно впливає на вихід біогазу та рівень виробництва метану.

1.2.2.6 Мікрородорості

Ще одним перспективним субстратом для виробництва біогазу є мікрородорості. Біомаса водоростей має низький вміст лігніну та целюлози, що робить її придатною для анаеробного зброджування. Мікрородорості

відзначаються високим вмістом ліпідів і полісахаридів, швидкими темпами росту, простотою культивування та збору, що забезпечує їх ефективне використання у виробництві біогазу.

Втім, вихід біогазу значною мірою залежить від штаму водоростей та параметрів технологічного процесу. Наприклад, у дослідженні 2021 року з використанням водоростей *Spirulina platensis* було досягнуто максимального виходу біогазу на рівні 740 мл/г органічної сухої речовини при температурі 70 °С, часу реакції 4 години та застосуванні 6 % розчину NaOH для лужної підготовки сировини. В іншому дослідженні, проведеному того ж року, з використанням водоростей *Chlorella pyrenoidosa*, для необробленої біомаси було отримано вихід біогазу 479 мл/г, з яких 147 мл припадало на метан.

Вихід метану залежно від виду субстрату коливається від 0,0178 до 0,501 м³/кг. Енергетичний потенціал (у перерахунку на тонну свіжої маси) варіює в межах від 96 до 409,6 кВт·год/т.

Найвищий енергетичний вихід, згідно з даними 2018 року, було зафіксовано для силосу з кукурудзи. Друге місце посіли кухонні відходи з показником метанового виходу 0,501 м³/кг (дані 2020 року). Водночас найнижчі показники були характерні для стічних вод целюлозно-паперової промисловості та осаду стічних вод. Таким чином, кухонні відходи є найбільш перспективною сировиною в цій категорії для виробництва біогазу.

1.2.3. Передові технології підготовки сировини

Технології попередньої обробки біомаси для виробництва біогазу охоплюють фізичні, термохімічні, хімічні та окислювальні методи. До фізичних відносять механічну обробку, екструзію та мікрохвильове опромінення; термохімічні включають обробку гарячою водою під тиском і вибух паром; хімічні — застосування лугів, кислот та органічних розчинників; а також окислювальні методи, зокрема вологе окислення, вибух із зволоженням та озоноліз.

У фізичній обробці сировина піддається впливу без використання хімічних речовин або мікроорганізмів, що змінює розмір частинок, кристалічність целюлози, ступінь полімеризації, розмір пор і площу поверхні. До таких методів належать різні технології подрібнення, які застосовують перед анаеробним зброджуванням. Наприклад, у 2020 році було встановлено, що використання подрійного млина для обробки тростини та соломи збільшує вихід метану на 137% порівняно з необробленою сировиною.

Мікрохвильове опромінення забезпечує швидке нагрівання біомаси з низьким температурним градієнтом, що знижує витрати енергії. Останнім часом активізувались дослідження комбінованої обробки, яка поєднує мікрохвилі з ультразвуком. Така комбінація дозволяє зменшити розмір частинок, збільшити площу поверхні, а також підвищити доступність олігосахаридів, целюлози та геміцелюлози. Це пришвидшує гідроліз і біодеградацію агровідходів та осадів стічних вод, що використовуються для виробництва біогазу. У 2024 році було

доведено, що ультразвукова обробка з низькою частотою ефективно підвищує вихід біогазу зі звалищного фільтрату.

Екструзійна обробка поєднує тепловий і механічний вплив за рахунок обертання гвинта у герметичній камері. У 2024 році дослідники протестували шість конструкцій гвинтів із різним рівнем зсуву й досягли збільшення виробництва біометану на 190% порівняно з базовими зразками.

Термохімічна обробка гарячою водою передбачає обробку біомаси під високим тиском без додавання реагентів. При цьому вода залишається рідкою за температур 140–220 °С, проникає в біомасу, викликає гідроліз геміцелюлози, збільшує площу поверхні й сприяє видаленню лігніну. У 2020 році було доведено, що термогідроліз стебел соняшнику значно підвищує вихід метану — до 87%.

Вибух парою (**рис. 1.2.3**) передбачає нагрівання сировини під тиском із насиченою парою, а потім — швидке зниження тиску. Це руйнує структуру лігноцелюлози. При тиску 5–50 бар і температурах 160–250 °С відбувається гідроліз геміцелюлози, а лігнін змінює структуру, що полегшує подальше зброджування. У 2021 році обробка березової деревини цим методом дала приріст виробництва біогазу на 155%, а подальше ферментативне зброджування — ще плюс 25%.

Лужна обробка з використанням NaOH, KOH, карбаміду чи гідроксиду кальцію застосовується переважно для лігноцелюлозної біомаси. Така обробка сприяє руйнуванню складових зв'язків, підвищує пористість, зменшує ступінь полімеризації та покращує ефективність ферментативного гідролізу. Комбінована обробка лугом (8% NaOH) та гідротермічна обробка при 175 °С у 2020 році підвищила вихід біогазу з міскантусу на 53% і скоротила тривалість анаеробного процесу на 45%.

У кислотній обробці використовують HNO₃, H₃PO₄, H₂SO₄ або HCl з концентрацією 30–70%, при температурах нижче або вище 100 °С. Такі кислоти гідролізують целюлозу та підвищують вихід метану. У 2022 році було доведено, що поєднання розбавленої кислотної обробки з додаванням біовугілля з гною підвищує вихід біогазу на 99%, а метану — на 77%.

Обробка органічними розчинниками (з каталізаторами або без) також є ефективною. Наприклад, у 2022 році застосування органічних розчинників для обробки трави Nap'єра та силосу з подальшим ферментативним гідролізом дало подвоєний вихід метану та покращило видалення лігніну.

Одним із ефективних методів попередньої обробки є волога окислювальна обробка, за якої до сировини додається вода та окисник, наприклад, пероксид водню (H₂O₂). Після цього біоматеріал нагрівається при температурі від 125 до 300 °С та тиску від 0,5 до 20 МПа. Така обробка, зокрема для відходів маслопальнової промисловості, дозволяє підвищити вихід метану більш ніж удвічі — з 19,7 до 52,7%.

У методі advanced wet explosion температура становить 140–220 °С, а тиск — до 3,5 МПа. Після досягнення необхідних параметрів у реактор подається кисень і проводиться нагрівання протягом 5–120 хвилин. По завершенні процесу

тиск різко знижують, а біоматеріал виводять із реактора. Так, для осаду стічних вод застосування такої обробки дозволило підвищити середній вихід метану до 183 мл/г органічних сухих речовин при 165 °С, 15 хвилих експозиції та 10% концентрації кисню.

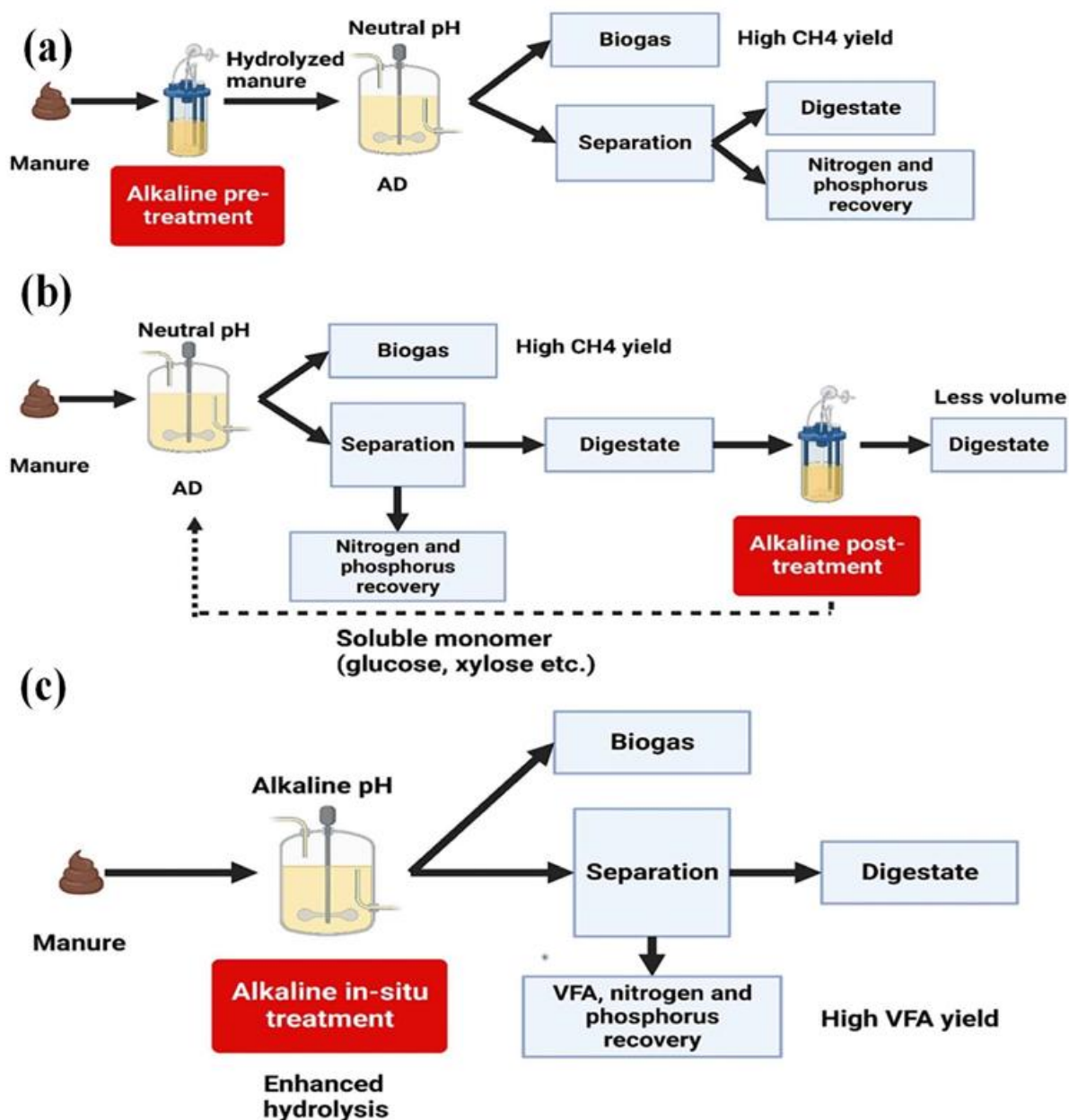


Рис. 1.2.3 Різні конфігурації для процесів лужного анаеробного розкладання; (а) попередня обробка, (б) подальша обробка та (с) для використання на місці

Ще одним підходом є озоноліз, у якому як окисник використовується озон. Цей процес ефективно руйнує лігнін, не створюючи інгібіторів, оскільки проходить за атмосферного тиску та температури. Важливу роль відіграє вода, яка сприяє розчиненню біоматеріалу. Застосування озонолізу для підготовки ферментативних гідролізатів дозволяє підвищити вихід біоводню до 78,2 %, а метану — до 260 нмл СН₄/г.

Різноманітна органічна сировина може використовуватись для анаеробного зброджування, що потребує індивідуального підходу до вибору

попередньої обробки. Успішність процесу визначається балансом між витратами (операційними та капітальними) та приростом виходу біогазу. Одним зі шляхів зниження витрат є використання ко-зброджування, яке продемонструвало вищу ефективність порівняно з використанням одного виду сировини.

Біогаз утворюється в анаеробних умовах під дією специфічних мікроорганізмів і має теплоту згоряння 21–24 МДж/м³. Його основними компонентами є метан і вуглекислий газ, тоді як домішки — силоскани, сірководень і водяна пара — спричиняють корозію обладнання і знижують енергетичну цінність. Видалення CO₂ дозволяє підвищити теплоту згоряння до 35,8 МДж/м³ і розширити сфери використання біогазу.

Сьогодні у світі застосовуються чотири основні технології виробництва біогазу: інсинерація (термохімічний процес), захоронення відходів, анаеробне зброджування та аеробне компостування (біологічні процеси). Вибір найоптимальнішої технології є складним завданням і враховує екологічні, економічні, соціальні та сталі критерії. Для об'єктивної оцінки використовується метод багатокритеріального прийняття рішень (MCDM), зокрема ієрархічний аналіз (АНР). У більшості випадків лідируючою технологією лишається анаеробне зброджування, що відповідає сучасним європейським цілям у сфері розвитку відновлюваної енергетики.

1.2.3.1. Новітні технології виробництва та очищення біогазу

Біогаз утворюється в контрольованих умовах у результаті анаеробної активності спеціально підібраних бактерій і має теплотворну здатність у межах 21–24 МДж/м³. Природне розкладання органічних речовин в анаеробних умовах щорічно спричиняє викиди до 800 млн тонн метану в атмосферу.

Склад біогазу є досить складним, що певною мірою обмежує його широке застосування. Він являє собою суміш газів, де основну частину становлять метан і вуглекислий газ, а також незначні кількості водню (1–5%). Саме метан забезпечує легке згоряння біогазу, тоді як CO₂ знижує його теплотворну здатність і ускладнює транспортування. До інших компонентів біогазу належать силоскани, сірководень і водяна пара — вони спричиняють корозію обладнання та знижують теплову ефективність. Тому важливо видаляти CO₂ та інші корозійні домішки, щоб підвищити теплотворну здатність біогазу до 35,8 МДж/м³ та розширити можливості його використання.

У світі застосовують чотири основні технології виробництва біогазу: спалювання (термохімічний процес), захоронення відходів, анаеробне зброджування та аеробне компостування (біологічні процеси). Вибір оптимальної технології є складним завданням, оскільки залежить від низки взаємопов'язаних факторів. Одним з інструментів об'єктивного вибору є метод багатокритеріального прийняття рішень (наприклад, метод аналітичної ієрархії), що враховує екологічні, економічні, соціальні та критерії сталості при виробництві енергії з відходів.

Згідно з результатами дослідження, проведеного в 2021 році, пріоритетність технологій за умовами трьох основних і дев'яти додаткових критеріїв виглядає так: спалювання > анаеробне зброджування > аеробне

зброджування > утилізація звалищного газу. Однак ця послідовність може змінюватися залежно від національних стратегій і можливостей інтеграції.

Незважаючи на це, провідною технологією залишається саме анаеробне зброджування, що відповідає актуальним цілям Європейського Союзу у сфері біогазового виробництва, зокрема в межах стратегічної ініціативи «Газ для клімату – 2050».

1.2.3.2. Етапи виробництва біогазу методом анаеробного зброджування

Процес анаеробного зброджування (AD) включає чотири основні етапи: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез. Ці стадії відбуваються в спеціальному реакторі й забезпечують утворення біогазу з органічних відходів (господарських, промислових, харчових, побутових тощо).

Гідроліз — перша стадія, на якій великомолекулярні органічні сполуки (вуглеводи, білки, жири) розкладаються на низькомолекулярні сполуки — леткі жирні кислоти (пропіонова, масляна тощо), спирти, альдегіди, CO₂ та H₂. Цей процес відбувається за участю сапрофітних бактерій і позаклітинних ферментів. Для ефективного розщеплення біополімерів потрібні кислі катализатори. У гідролізі активні ферментативні бактерії, зокрема Clostridia та Bifidobacteria, які розкладають біомаси до розчинних цукрів і жирних кислот. Головними продуктами цієї стадії є ацетат і водень, які далі використовуються метаногенами.

Ацидогенез — друга стадія, на якій продукти гідролізу перетворюються на органічні кислоти, спирти, альдегіди, CO₂ та H₂. Це здійснюють ацидогенні бактерії.

Ацетогенез — третя стадія, на якій продукти ацидогенезу (наприклад, пропіонат, глюкоза, етанол) далі перетворюються на ацетат. Основну роль відіграють бактерії роду Syntrophomonas та Syntrophobacter. Отриманий ацетат далі споживається метаногенами.

Метаногенез — фінальна стадія, під час якої метаногени (зокрема ацетокластичні й водневі редуруючі мікроорганізми) перетворюють ацетат і CO₂ на метан (CH₄). Ці мікроорганізми активні в умовах слабо лужного середовища (рН 6.8–7.2). При зниженні рН нижче 6 їх життєздатність погіршується. Під час ацидогенезу значно виділяється CO₂ і рН падає до 6, але далі, при нормальному буферуванні (рН 6.6–7.5), біодеградація стає ефективною.

Метаногени належать до хемолітотрофних мікроорганізмів, оскільки використовують вуглекислий газ як джерело вуглецю.

1.2.3.3. Фізико-хімічні технології

Для обробки, підготовки та очищення біогазу існує низка сучасних технологій, які використовуються як на стадії підготовки сировини, так і для підвищення якості отриманого біогазу. Основними причинами застосування таких технологій є необхідність видалення домішок — сірководню (H₂S), водяної пари, аміаку, силосанів — які негативно впливають на використання біогазу як палива та ускладнюють його транспортування й застосування в мережах природного газу. Другою причиною є зменшення вмісту вуглекислого газу (CO₂) задля підвищення теплотворної здатності біогазу та зниження його щільності до

відповідності стандартам теплотворної цінності (Wobbe-індексу). Залежно від технології, також можливе накопичення або утилізація CO_2 , що надає біогазу статусу вуглецево-нейтрального енергоресурсу.

У результаті процесу очищення формується кінцевий продукт — біометан, який, залежно від призначення, має вміст метану на рівні 95–99 %, вуглекислого газу — 1–6 %, сірководню — до 0,05 %. Основні технології очищення біогазу включають: абсорбційне очищення (scrubbing), мембранну сепарацію, адсорбцію при змінному тиску (PSA) та криогенне розділення (рис. 1.2.4).

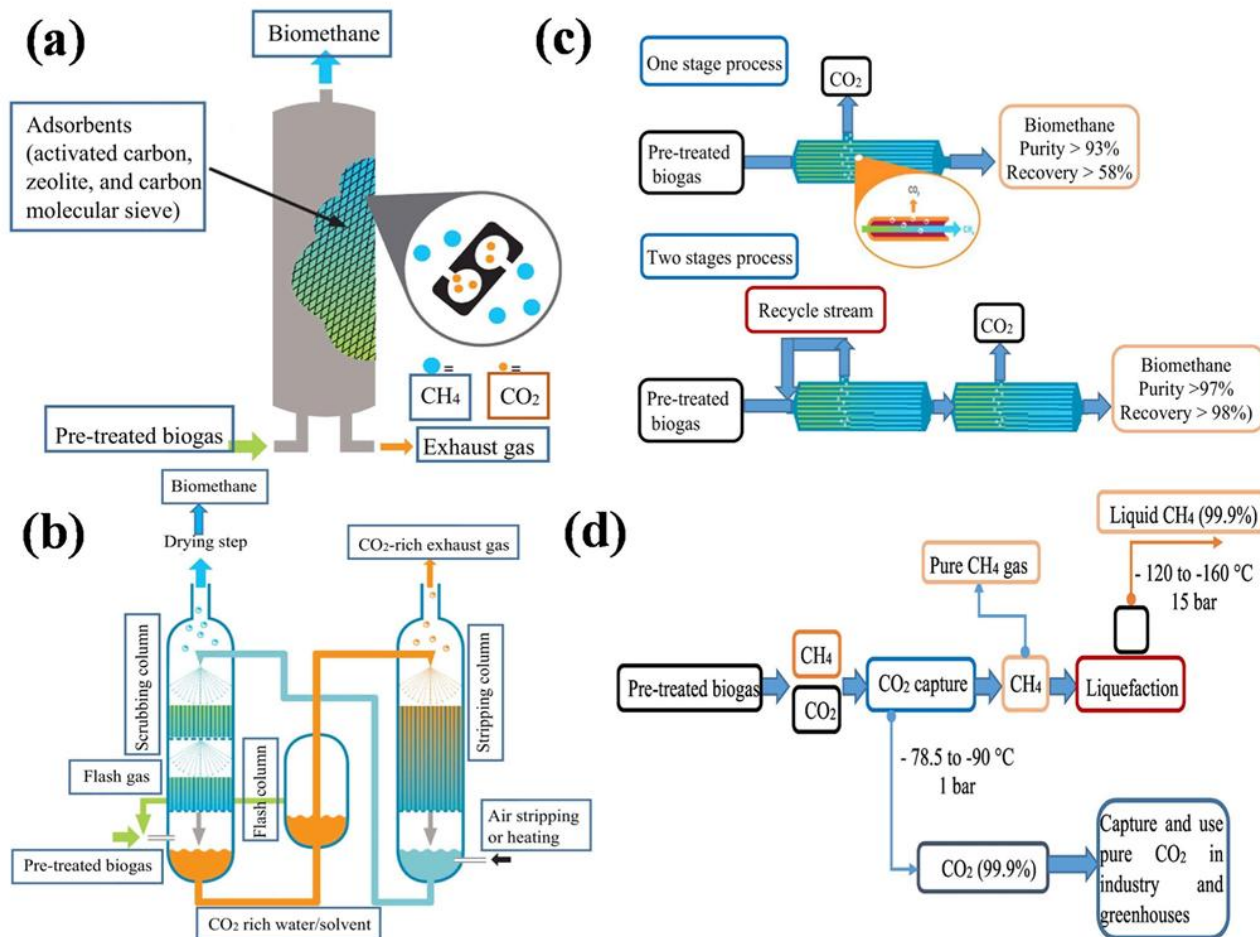


Рис. 1.2.4 Технології модернізації біогазу; (а) Адсорбція при коливаннях тиску, (б) Технологія скрубінгу для розділення CH_4 та CO_2 . Мембранне розділення та (д) Криогенна технологія

Абсорбційні методи базуються на різниці розчинності CO_2 і CH_4 у рідких середовищах. У процесах скрабування можуть застосовуватися як вода, так і органічні розчинники. Наприклад, при використанні водяного скрабування попередньо оброблений біогаз подається при температурі близько $40\text{ }^\circ\text{C}$ і тиску 6–10 бар у вертикальну колонну, де CO_2 розчиняється у воді, що в понад 20 разів краще, ніж метан. Для очищення біогазу з витратою $1000\text{ м}^3/\text{год}$ потрібно близько $200\text{ м}^3/\text{год}$ води, що робить доцільним її регенерацію, особливо в умовах очисних споруд.

Альтернативою є використання органічних розчинників, таких як метанол, поліетиленглікольдиметилловий ефір, пропіленкарбонат, трибутилфосфат,

тетраметиленсульфон, N-метил-2-піролідон та N-формілморфолін. Ці речовини мають вищу розчинність CO₂ порівняно з водою, тому потребують менше об'ємів і дозволяють зменшити розміри абсорбційної колони. Процес абсорбції відбувається при тисках 4–8 бар, що потребує менше енергії, ніж водяний варіант.

Щодо ефективності різних розчинників, результати досліджень 2021 року показали наступний порядок за енергетичними та економічними показниками: поліетиленглікольдиметиловий ефір \approx N-метил-2-піролідон > N-формілморфолін > метанол > вода. Основною проблемою органічних розчинників залишається їх регенерація: традиційні методи, такі як вакуумне зниження тиску або продування повітрям, не є ефективними. Використовують три основні методи регенерації: термічну десорбцію (гарячий процес), флеш-десорбцію при зниженні тиску, а також продування інертним газом.

Ще однією технологією очищення біогазу є хімічне скрубвання або хімічна абсорбція. Цей метод ґрунтується на зворотній реакції між вуглекислим газом (CO₂) та хімічними сорбентами, найчастіше — амінами, такими як метилдиетаноламін (MDEA). Завдяки вибірковій реакції з CO₂ втрата метану в цьому процесі мінімальна, а сам процес не потребує додаткової обробки очищеного газу. При хімічному скрубванні можливо досягти високої чистоти метану (до 99%). Водночас необхідне попереднє видалення сірководню (H₂S), оскільки він вступає у корозійні реакції з розчинами амінів. Порівняно з фізичними методами, регенерація сорбенту є енергоємним процесом через міцні зв'язки між газовими молекулами. Загалом на регенерацію витрачається від 15 до 30% енергії, виробленої біометаном. Сучасні дослідження зосереджені на зниженні цих витрат шляхом використання нових складів амінів та оптимізації умов процесу (наприклад, температури та швидкості потоку газу). Принцип роботи зображено на **рис. 1.2.4(b)**.

Технологія адсорбції з перемиканням тиску (Pressure Swing Adsorption, PSA) базується на різній здатності метану та CO₂ адсорбуватися на поверхнях спеціальних матеріалів. CO₂ легше адсорбується при підвищеному тиску та зниженій температурі, тому процес розділення досягається шляхом циклічного перемикання тиску і температури (**рис. 1.2.4(a)**). В якості адсорбентів використовують активоване вугілля, молекулярні сита, цеоліти, силікагель тощо. Оскільки H₂S також може адсорбуватись і викликати токсичні ефекти, перед застосуванням PSA необхідне знесірчення. Технологія широко впроваджена у практиці очищення біогазу. Якість отриманого біометану становить 96–98%, при цьому втрати CH₄ — лише 1,5–2,5%. Для запобігання викидам метану в атмосферу необхідна система догорання відпрацьованих газів. Споживання енергії PSA коливається у межах 0,15–0,35 кВт·год/нм³ біогазу, що робить цей метод досить ефективним.

Технологія мембранного поділу (рис. 1.2.4(c)) базується на різній проникності газів крізь пори мембран завдяки відмінностям у розмірах молекул. Так, CO₂ проходить через мембрану значно легше, ніж метан, для якого проникність у 20 разів нижча. Побічний газовий потік, збагачений CO₂, може бути використаний у харчовій промисловості. Дослідження показали, що при охолодженні до 30 °С можна досягти 99,9% чистоти CO₂ після видалення азоту, кисню та залишків метану. Мембранне розділення зазвичай здійснюється під тиском 7–20 бар, із енергоспоживанням 0,18–0,33 кВт·год/нм³. При лабораторних дослідженнях втрати метану не перевищували 2%. Важливим етапом є попередня підготовка біогазу для захисту мембран і забезпечення високої чистоти CH₄.

Кріогенна технологія (рис. 1.2.4(d)) заснована на різниці точок кипіння метану та вуглекислого газу. За температури –78,5 °С та тиску 1 бар CO₂ переходить у твердий стан і може бути відокремлений від CH₄ методом ректифікації. В результаті отримують високочисті потоки як метану, так і CO₂ (до 99%). Втрати метану в цьому процесі перевищують 1%, а сама технологія ще перебуває на стадії розвитку. Основними недоліками є високі енергетичні витрати на стискання та охолодження біогазу, а також ризик закупорки обладнання замерзлим CO₂. Споживання енергії складає близько 10% від енергії, що виробляється з біометану. Проте можливе підвищення ефективності, зокрема за рахунок рекуперації енергії при зрідженні біометану та використання замороженого CO₂ як сухого льоду в промисловості.

Сучасні дослідження все більше зосереджуються на застосуванні нанотехнологій для підвищення ефективності виробництва біогазу. На рис. 1.2.5(a) показано схему перетворення лігноцелюлозної біомаси у біогаз за допомогою нанокаталізаторів. Використання наночастинок сприяє зменшенню рівня забруднень та підвищенню виходу біогазу, а також дозволяє знижувати концентрацію ХСК, CO₂ і H₂S.

У 2023 році дослідницька група на чолі з François встановила, що ефективність наночастинок залежить від маси, типу субстрату, його біорозкладаності, рН середовища та типу наноматеріалу. В іншому дослідженні показано, що вуглецеві наноматеріали можуть бути отримані з біовідходів і застосовані для підвищення виходу метану в анаеробному зброджуванні.

Ще одна новітня технологія — нанобульбашки (NB, рис. 5(b)). Це мікроскопічні бульбашки діаметром 50–200 нм, які мають сферичну форму, високу поверхневу зарядженість і тривалий час існування. Вони покращують розчинність газів, активність ферментів і сприяють мобільності води, виконуючи роль переносників кофакторів, зокрема коензиму F₄₂₀. Дослідження останніх років показали, що застосування NB може підвищити вихід метану на 14–21%, а його концентрацію — на 5% у порівнянні з контрольними зразками (де рівень метану становив 55%).

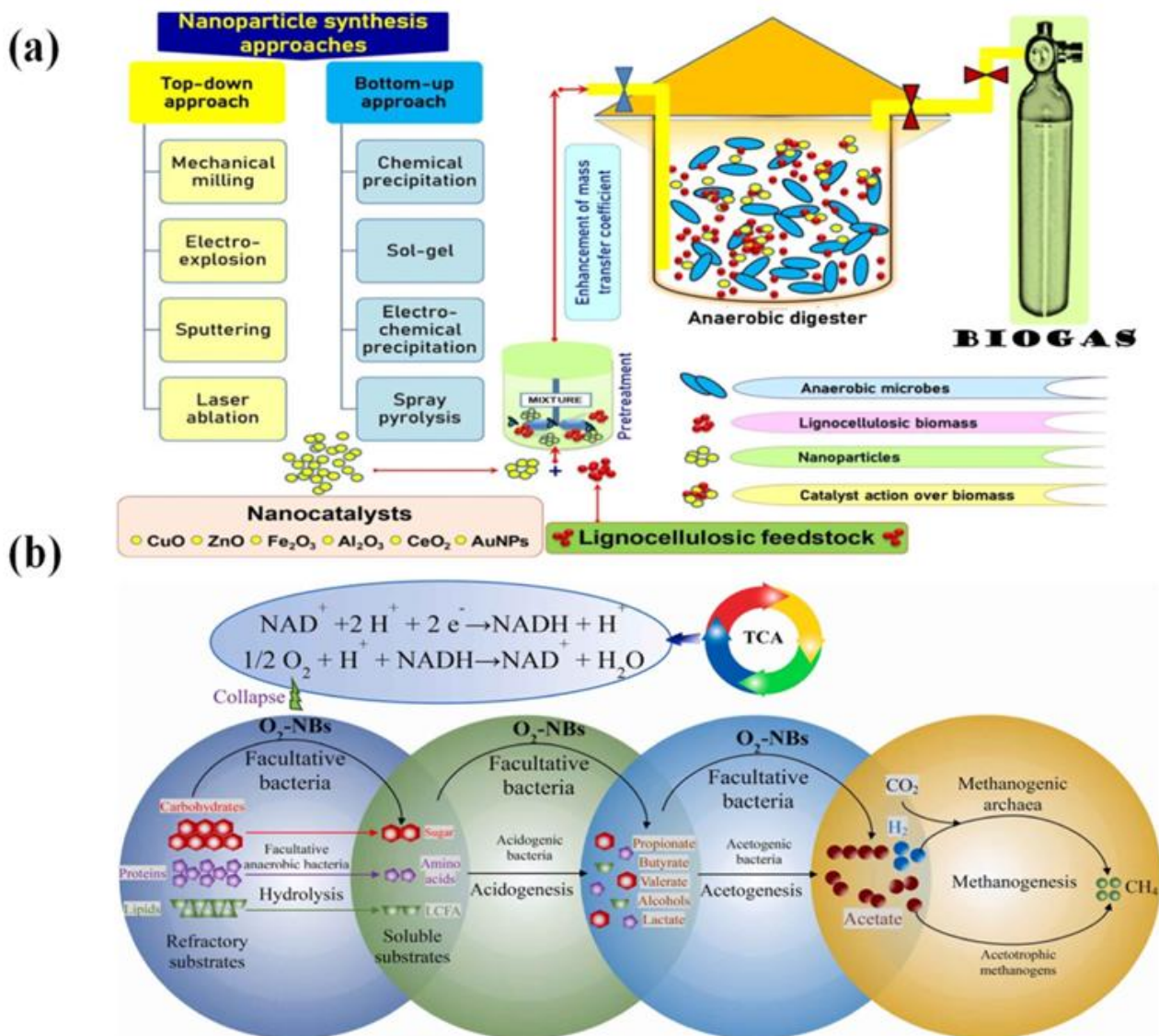


Рис. 1.2.5 (а) Механізм перетворення лігноцелюлозної біомаси в біогаз за допомогою нанокаталізатора та (б) Технологія нанобульбашок для виробництва біогазу шляхом анаеробного розкладання

1.2.3.4. Біохімічні технології

До біохімічних технологій, що сприяють підвищенню ефективності процесу виробництва біогазу, належать грибові, мікробні та ферментативні методи попередньої обробки. Ці методи є екологічно безпечними та сприяють покращенню загальної ефективності анаеробного зброджування.

З метою посилення гідролізу субстрату під час анаеробної дигестації важливо стимулювати ріст мікроорганізмів на біомасі, що досягається завдяки біохімічним технологіям. Зокрема, використовуються різні ферменти — ксиланази, протеази, целулази та лігнінолітичні ферменти — для перетворення сировини на доступні для зброджування цукри та для підвищення швидкості утворення біогазу. Застосування ферментів дозволяє уникнути утворення інгібіторних сполук у процесі зброджування (рис. 1.2.6).

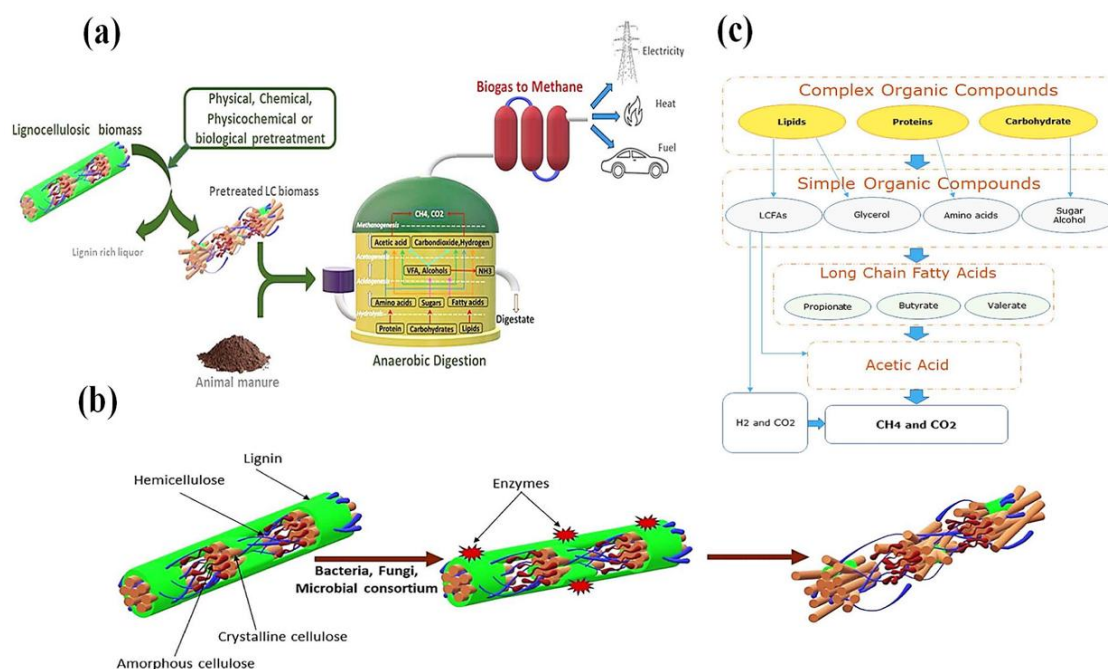


Рис. 1.2.6 Виробництво біогазу з лігноцелюлозної біомаси шляхом анаеробного розкладання, (b) процес біологічної попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси та (c) шляхи анаеробного розкладання органічної речовини

Для лігноцелюлозної сировини зазвичай перед ферментативною обробкою потрібне попереднє фізико-хімічне розщеплення структури. Комерційно доступні ферменти ефективно гідролізують субстрат, після чого продукти розщеплення використовуються мікроорганізмами для утворення біогазу.

Експерименти показали, що додавання ферментів до органічної фракції побутових відходів у поєднанні з компостованим гноєм дозволяє знизити вміст розчиненого органічного вуглецю на 61% і летких твердих речовин — на 35%, що, у свою чергу, забезпечує підвищення виходу метану на 60%. В інших дослідженнях також спостерігалось зростання виходу біогазу до 76% за рахунок ферментативної обробки.

Особливо ефективною є обробка біовідходів, що містять жири та олії, із застосуванням біо-сурфактантів. Вони підвищують розчинність таких речовин і забезпечують більшу біодоступність субстратів для ферментів, стимулюючи відповідно їх активність.

Грибкова обробка (аеробна або анаеробна) є поширеною біологічною технологією, що передбачає використання дереворуйнівних грибів, особливо грибів білого гниття (*Fusarium*, *Trametes*, *Phanerochaete*), для делігніфікації лігноцелюлозної біомаси при знижених температурах (рис. 1.2.7). Ці гриби розкладають целюлозу, геміцелюлозу та лігнін одночасно, утворюючи прості цукри та покращуючи ферментативну доступність сировини.

Ефективність делігніфікації залежить від активності лігнінолітичних ферментів — лаккази, манганової пероксидази та лігнінпероксидази — які секретуються базидіоміцетами. Водночас метод має певні недоліки: тривалість інкубації та втрата гексанових вуглеводів. Щоб отримати добре делігніфіковану

біомасу, багату на целюлозу, доцільно використовувати ретельно підібрані штами грибів білого гниття та оптимізувати умови їх культивування.

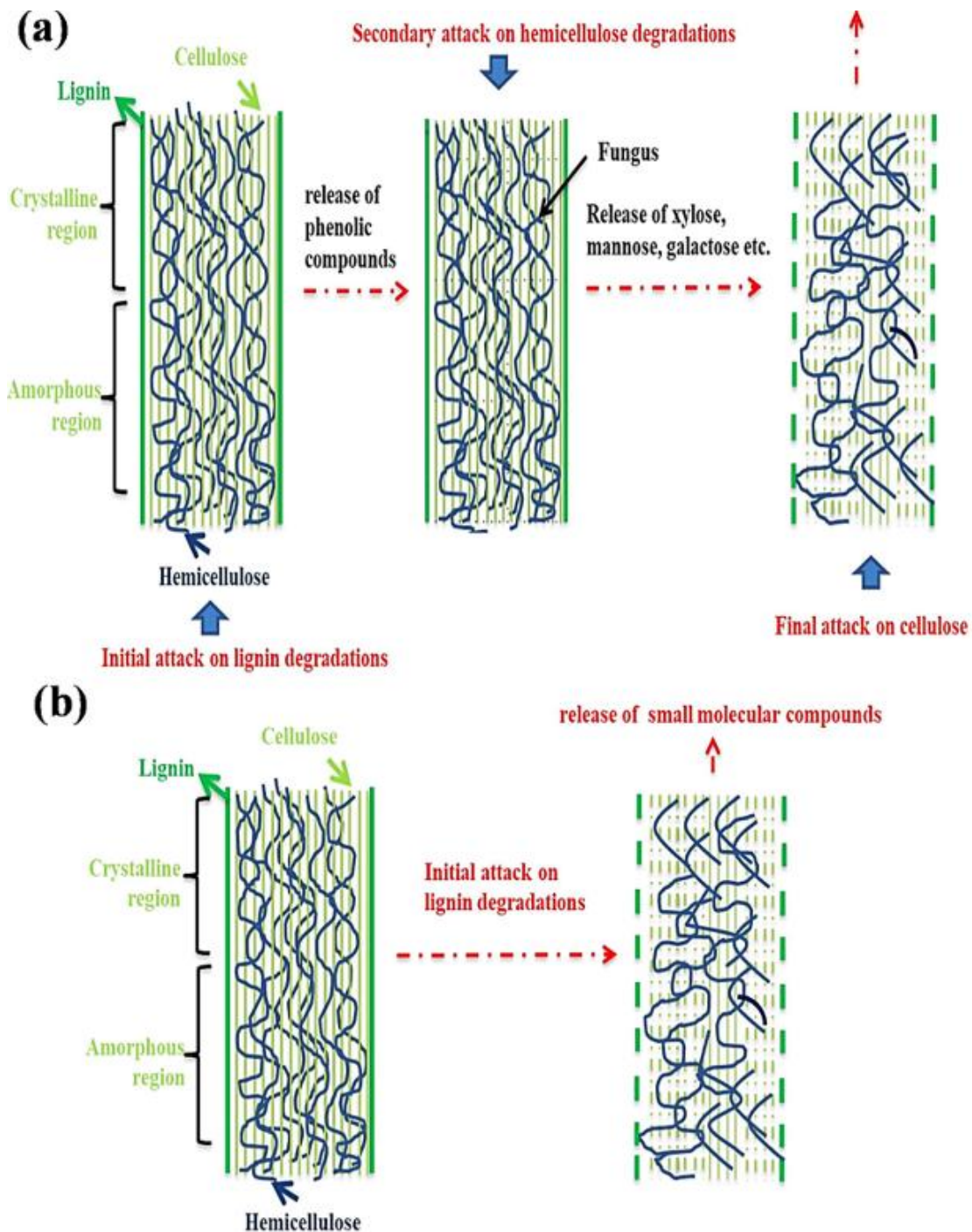


Рис. 1.2.7 Шляхи деградації субстрату грибами; (а) селективний процес та (б) неселективний процес

За результатами експериментів, застосування грибкової обробки дозволило підвищити вихід біогазу та метану в 1,65 раза у порівнянні з необробленою сировиною. Наприклад, обробка пшеничної соломи грибом із використанням інкубації протягом 15 днів забезпечила зростання виходу біогазу на 25%. Проте варто враховувати, що вартість цього виду обробки у 4–15 разів перевищує традиційні методи попередньої обробки. Поліпшення ефективності

можливе за рахунок регулювання вологості та додавання необхідних поживних речовин у поживне середовище.

Значного прогресу досягнуто і у використанні мікробних консорціумів — сумішей кількох штамів мікроорганізмів, що дозволяють ефективніше розкласти лігноцелюлозу, ніж окремі штами. На відміну від грибів, які переважно діють на лігнін, мікробні консорціуми спрямовані на руйнування целюлози та геміцелюлози.

Перевагою таких консорціумів є їх метаболічне різноманіття, що забезпечує адаптацію до умов процесу, стабілізацію рН, прискорений ріст, ефективне споживання субстрату та підвищення продуктивності подальшого ферментативного розщеплення.

Експериментальні дані свідчать, що при використанні синтетичного мікроаеробного консорціуму з *Methanosarcina acetivorans* та *Methanosaeta thermophila* для обробки гною спостерігалось підвищення вироблення біогазу на 44,78% завдяки подоланню пригнічення через зниження рН.

Інший консорціум, сформований на основі бактерій *Bacteroides* та *Clostridium*, забезпечив підвищення метанового виходу на 67,2% та ефективності розкладу сировини (порожніх плодів олійної пальми) на 57,5%.

1.2.3.5. Зелені технології апгрейду біогазу

Однією з перспективних технологій апгрейду біогазу є біоконверсія вуглекислого газу в метан за допомогою гідрогенотрофних метаногенів. У цьому процесі вуглекислий газ (CO_2), який є побічним продуктом анаеробного зброджування, перетворюється на метан (CH_4) за участі водню, отриманого шляхом електролізу води. Така технологія, відома як Power-to-Gas (P2G), дозволяє акумулювати надлишкову електроенергію з відновлюваних джерел (наприклад, сонячної чи вітрової) у формі метану. У результаті підвищується вміст метану в біогазі, що робить його придатним як паливо для транспорту.

До процесу можуть бути залучені три типи мікроорганізмів: гідрогенотрофні та ацетотрофні метаногени, а також гомоацетогени. Вибір мікроорганізмів залежить від типу субстрату, що використовується. За конфігурацією системи введення водню, технології апгрейду біогазу поділяють на *in-situ*, *ex-situ* та гібридні (рис. 1.2.8(b)).

- *In-situ* система поєднує анаеробний реактор і електролізер. Водень подається безпосередньо в реактор, де реагує з CO_2 , утвореним у процесі зброджування, і перетворюється на метан.
- *Ex-situ* система передбачає використання окремого реактора після стадії зброджування, де CO_2 видаляється шляхом біологічної реакції з воднем, отриманим з електролізу.
- Гібридна система об'єднує обидва підходи — біомітигацію CO_2 всередині реактора та біометанацію в окремому біореакторі.

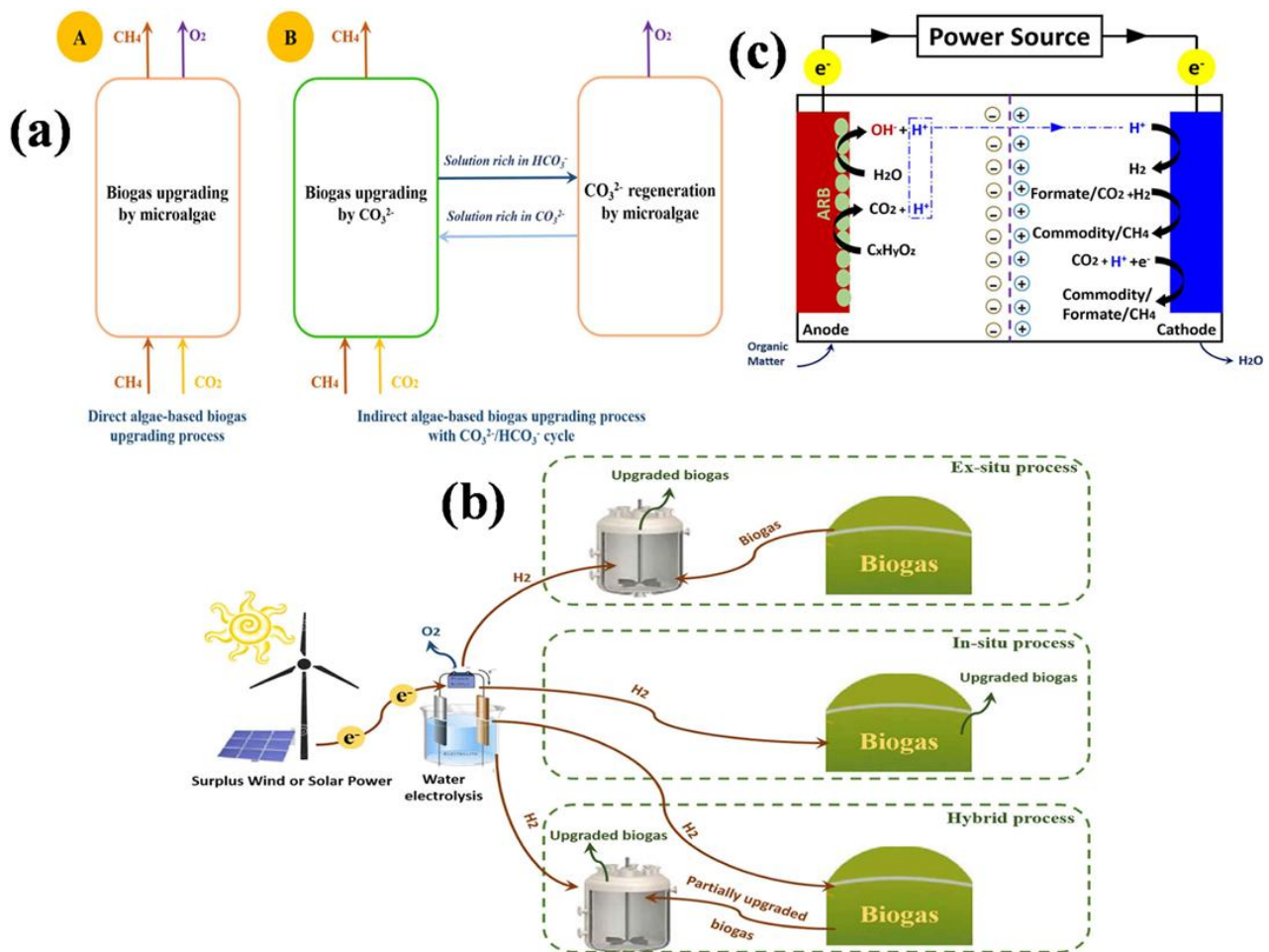


Рис. 1.2.8 Технології модернізації біогазу; (а) Використання мікрроводоростей, (б) Різні конструкції процесів модернізації біогазу на основі H_2 та (с) Технологія мікробних електролізних комірок

У дослідженнях, проведених 2021 року, при використанні ex-situ підходу вдалось досягти вмісту метану понад 97% у біогазі, отриманому з активного мулу.

Ще однією ефективною технологією є використання мікробної електролітичної комірки (МЕС), яка має низькі енергетичні витрати. У такій системі андореспіруючі бактерії окислюють органічні речовини зі стічних вод, генеруючи струм і вивільняючи іони водню (H^+). Ці іони переходять до катода, де відновлюються у водень, який потім використовується для перетворення CO_2 у метан гідрогенотрофними метаногенами. Також можливе виробництво багатовуглецевих сполук з використанням ацетогенних мікроорганізмів (рис. 8(c)). За результатами одного з досліджень, така система щоденно утримувала 13,2 г CO_2 .

Іншим підходом є фотосинтетична біофіксація CO_2 за допомогою мікрроводоростей. Ці мікроорганізми мають високу швидкість росту, ефективно споживають поживні речовини з різних типів води і пристосовані до різних умов. Існують дві основні конфігурації цього процесу — пряма та непряма (рис. 1.2.8(a)). Біогаз подається в реактор з фотосинтетичною системою, де мікрроводорості поглинають CO_2 завдяки процесу фотосинтезу, використовуючи

сонячне світло. Побічно можуть утворюватися H_2S і O_2 , які видаляються за допомогою бактерій-окиснювачів сірки.

У підсумку, вміст CO_2 у біогазі може бути знижено до рівня 2–6%, що дозволяє отримати біометан високої якості. Ця технологія не лише сприяє підвищенню ефективності біогазу, але й дозволяє повторно використовувати вуглекислий газ, сприяючи сталому розвитку в умовах циркулярної економіки.

1.2.4. Технологічні виклики виробництва біогазу

Сирий біогаз утворюється з біомасової сировини у процесі анаеробного зброджування (АЗ), який зазвичай включає чотири основні стадії. У цьому процесі органічна частина біовідходів розкладається в умовах відсутності кисню до простих молекул, що включають метан (CH_4) – 40–65%, вуглекислий газ (CO_2) – 35–55%, сірководень (H_2S) – 0,1–3%, водяну пару та інші леткі органічні речовини. Калорійність біогазу становить близько 37,3 МДж/м³, або 5000–7500 ккал/м³.

Процес АЗ базується на активності мікроорганізмів, що функціонують без доступу кисню, розкладаючи складні органічні сполуки на простіші. Для цього залучаються різні типи бактерій: сапрофітні, клостридії, біфідобактерії, ацидогенні та ацетогенні бактерії, а також метаногенні мікроорганізми, які відповідають за утворення CH_4 . Біогаз, що утворюється на кожному з етапів, має різний склад, і зміни у параметрах середовища можуть суттєво вплинути на швидкість реакцій. Адаптація мікроорганізмів до нових умов може займати до місяця. Нестабільність у мікробіологічному консорціумі може призвести до зниження продуктивності або навіть до накопичення інгібуючих сполук.

1.2.4.1. Чинники, що впливають на виробництво біогазу

На ефективність анаеробного зброджування впливає низка параметрів, які мають постійно контролюватися та підтримуватись у межах оптимальних значень.

Температура є критично важливим фактором, оскільки вона впливає на активність як кислотопродукуючих, так і метаногенних бактерій. Анаеробне зброджування проводиться у трьох температурних діапазонах:

- Психрофільний: 10–20 °С
- Мезофільний: 20–45 °С
- Термофільний: 50–65 °С

Найчастіше застосовуються мезофільні (оптимум 35 °С) або термофільні (оптимум 55 °С) умови. Термофільна обробка має переваги, як-от прискорення реакцій, зниження патогенності субстрату та менша потреба в поживних речовинах. Проте вона вимагає більше енергії для підтримання високої температури.

рН-середовища. рН є одним із найважливіших параметрів, що визначає стабільність процесу. Оптимальні значення:

- Гідроліз: $\approx 6,0$
- Ацетогенез: 6,0–7,0
- Метаногенез: 6,5–7,5

Для ферментації метану ідеальний діапазон рН – 6,8–7,2. Вихід метану може зменшуватись на 75% при рН < 5,0. Значні коливання рН можуть бути викликані концентраціями летких жирних кислот (VFA) або недостатнім буферним потенціалом. Збалансоване співвідношення $\text{HCO}_3^-/\text{VFA}$ допомагає стабілізувати процес.

Час утримання (retention time) поділяється на:

- Гідравлічний час утримання (HRT) — час перебування субстрату в реакторі;
- Час утримання твердої фази (SRT) — час перебування мікроорганізмів у системі.

Для мезофільного режиму типовий HRT — від 10 до 40 днів. У термофільному режимі він скорочується, завдяки швидшому перебігу біохімічних реакцій. Чим довший час утримання, тим повніше переробляються органічні речовини, покращується контакт мікроорганізмів із субстратом та стабілізується шлам.

Органічне навантаження (OLR). Органічне навантаження виражається у кількості органічної речовини, що надходить у реактор на одиницю об'єму за добу. Зазвичай вимірюється в одиницях хімічного споживання кисню (COD) або летких твердих речовин (VS).

Занадто високе OLR може призвести до:

- Надмірного накопичення VFA
- Зниження рН
- Пригнічення метаногенних бактерій
- Зменшення газоутворення

Вуглецево-азотне співвідношення (C/N). Оптимальне співвідношення C/N має становити 30–35:1. Вуглець споживається мікроорганізмами значно швидше, ніж азот, і при його надлишку може відбуватись накопичення недоокиснених сполук, що порушує баланс у системі.

Ці фактори відіграють ключову роль у підтриманні стабільності процесу зброджування та досягненні високих показників виробництва біогазу. Порушення одного з них може спричинити деградацію системи або навіть повну зупинку ферментації.

1.2.4.2. Експлуатаційні параметри та стратегії проєктування реакторів

Біореактори для виробництва біогазу повинні функціонувати за умов, що забезпечують оптимальну роботу мікроорганізмів, зокрема метаногенів, які беруть участь у процесі перетворення субстрату. Одним із критичних параметрів є рН, оскільки його невідповідні значення можуть пригнічувати активність мікроорганізмів. Температура також відіграє важливу роль, впливаючи на життєдіяльність і активність мікробних спільнот. Крім того, необхідно забезпечити наявність поживних речовин, оскільки їхній дефіцит або наявність інгібіторів може погіршити ефективність роботи реактора.

Існує кілька конфігурацій анаеробних реакторів, вибір яких залежить від типу біовідходів і наявного простору: анаеробний реактор із повним перемішуванням (FSTR), фіксований шаровий реактор (FBR) та його варіанти — анаеробний реактор із заповненим шаром (APBR), реактор із висхідним потоком

(UAFR), анаеробний реактор із псевдозрідженим шаром (AFBR), реактор із висхідним потоком і гранульованим осадом (UASB), реактор із розширеним гранульованим шаром (EGSB), мембранний анаеробний реактор (AnMBR), структурований анаеробний реактор (ASTBR), горизонтальний анаеробний реактор із іммобілізованою біомасою (HAIB) та гібридний анаеробний реактор (HAR).

На ефективність виробництва біогазу впливають біологічні, фізичні та хімічні чинники: тип сировини, технологія її передобробки та склад мікроорганізмів. Установки анаеробного зброджування класифікують на мікро-, малі, середні та великі за потужністю когенераційної установки: <15, від 15 до 99, від 100 до 299 та >300 кВт_е.

Малі анаеробні системи (SSAD) можуть варіюватися залежно від географічного розташування, типу сировини, кліматичних умов і режиму експлуатації. Їх поділяють на низькошвидкісні, високошвидкісні та пасивні системи, такі як закриті лагуни. У низькошвидкісних системах час утримання субстрату в реакторі становить 10–30 діб, що дозволяє збільшити вихід біогазу. Ці системи працюють у мезофільному (25–40 °C) або термофільному (50–65 °C) температурному діапазоні, потребують додаткового підігріву та зображені на **рис. 1.2.9**.

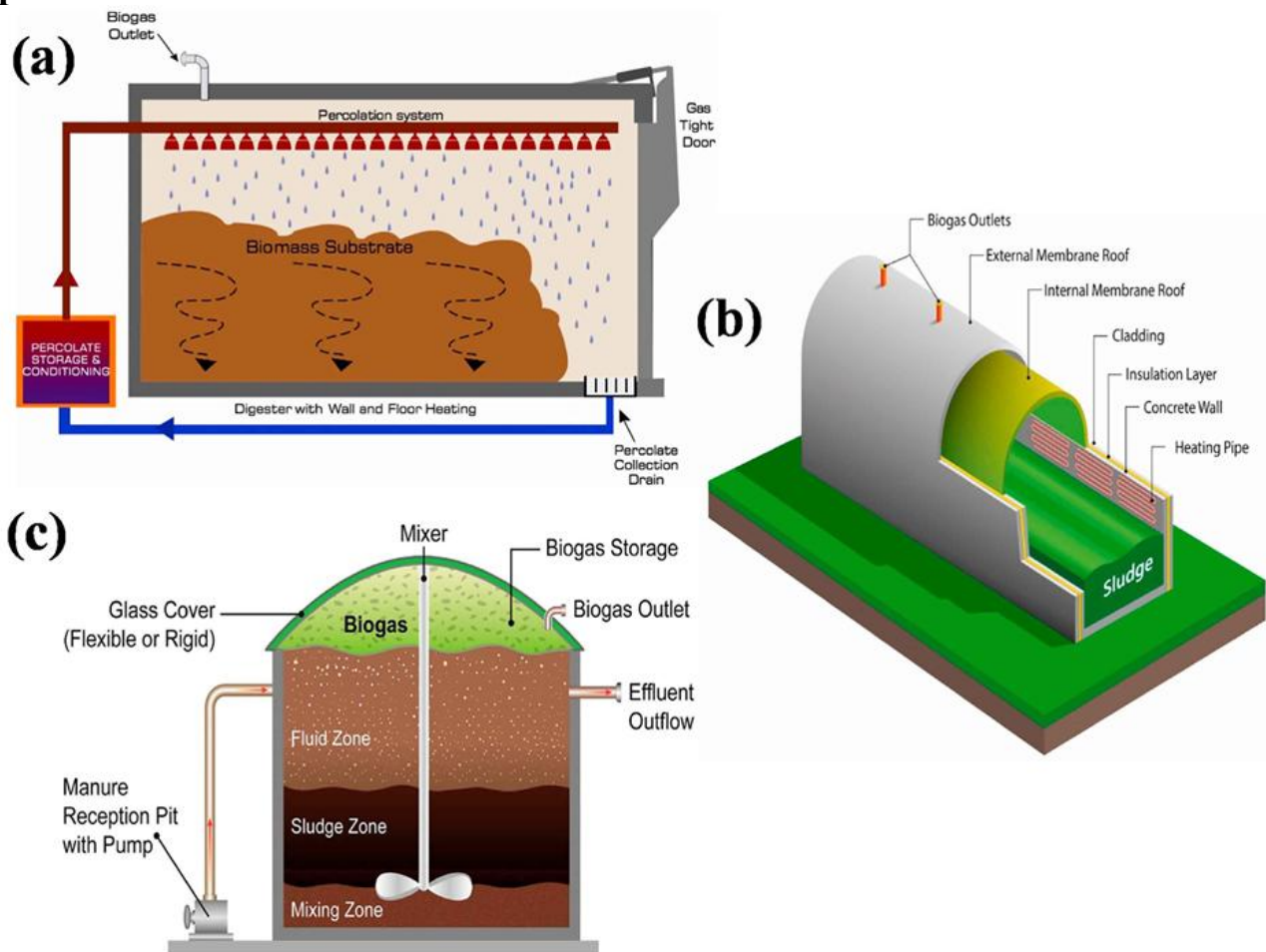


Рис. 1.2.9 Різні низькопродуктивні системи для біогазових реакторів; (а) гаражного типу, (б) поршневого типу та (с) реактори з повним змішуванням

- (а) Установки типу «гараж» працюють у режимі сухого зброджування, зазвичай у пакетному режимі тривалістю 4–5 тижнів, із використанням перколяційного баку. Вони придатні для сировини з високим вмістом сухих речовин (>15%).
- (б) Реактори типу plug-flow (рис. 1.2.9b) забезпечують поступове переміщення сировини в реакторі без змішування. Вони ефективні для сировини з вмістом сухих речовин >10%, зменшують об'єм реактора та час пуску. У порівнянні з реактором із повним перемішуванням (CSTR), plug-flow системи витримують удвічі більше сухих речовин і мають утричі більше органічне навантаження за коротшого часу гідравлічного утримання.
- (в) Реактори з повним перемішуванням (CSTR) (рис. 1.2.9c) потребують систем підігріву та перемішування, підтримують час утримання 20–30 діб, і підходять для біовідходів із вмістом сухих речовин 3–10%. Вдосконаленням CSTR є двофазні системи, де в першій фазі ферментативні бактерії розкладають органіку, а в другій — метаногени перетворюють органічні кислоти в біогаз. Дослідження демонструють підвищення виходу біогазу на 31–57% завдяки передобробці сировини грибами та бактеріями.

Високошвидкісні системи зберігають тверді речовини в реакторі довше, а рідку фракцію — коротше. Це призводить до вищої концентрації мікроорганізмів і скорочення часу утримання до <10 днів (рис. 1.2.10a).

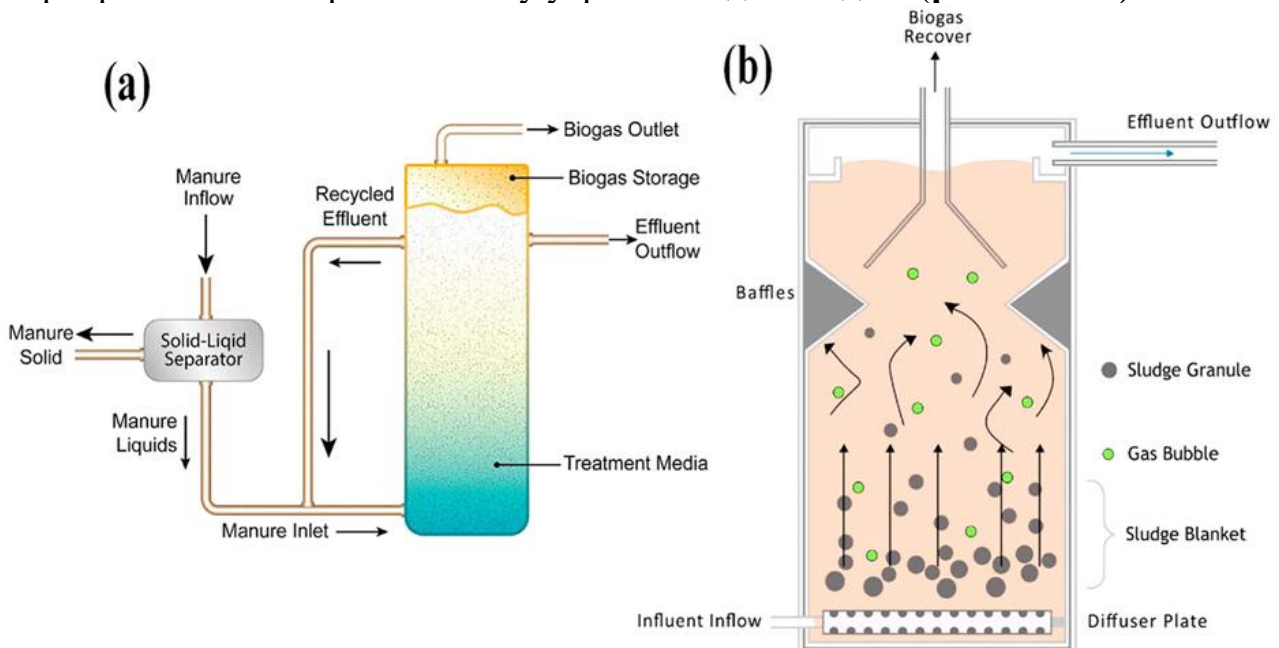


Рис. 1.2.10 Різні високопродуктивні системи для біогазових реакторів; (а) Біологічний реактор з фіксованою плівкою та (б) Реактор з індукованим шаром

Серед них виділяють:

- Фіксовано-плівкові реактори, в яких використовується середовище для росту мікроорганізмів, що дає змогу скоротити час гідравлічного утримання до 2–6 днів.

- Індукційні реактори із шаром, в яких використовується висхідний потік для підтримки мікроорганізмів у підвішеному стані. Великі частинки залишаються в реакторі, утворюючи біоплівки, що сприяє підвищенню кількості метаногенів.
- Реактор типу UASB добре підходить для розбавлених потоків із вмістом сухих речовин <3%, тоді як реактори з індуктованим середовищем ефективніші для сировини з вмістом сухих речовин 6–12%.

1.2.5. Застосування біогазу: перспективи та можливості

Біогаз і метан як його основні компоненти зустрічаються в природі й мають значний негативний вплив на зміну клімату. Метан традиційно використовувався як викопне паливо — для виробництва енергії, транспортування та опалення. Більшість споживаного метану походить із природного газу. Проте в останні роки активно розвиваються підходи до виробництва біометану з відходів, і тому в багатьох розвинених країнах з'являються сучасні біогазові установки.

Розробляються численні промислові застосування біометану як заміника природного газу, оскільки біогаз регулярно використовується для виробництва електроенергії та тепла. Це створює широкі можливості для його застосування в соціальному та промисловому секторах.

Найперспективнішим видом відновлюваної енергії вважається біогаз, отриманий з органічних відходів. Його основними компонентами є CO_2 і CH_4 , які, потрапляючи в атмосферу зі сміттєзвалищ або фермерських господарств, суттєво посилюють парниковий ефект. Тому надзвичайно важливо організувати виробництво біогазу в контрольованих умовах, де його можна використовувати для генерації як електричної, так і теплової енергії.

Сировинна база для біогазових установок охоплює цукрову тростину, лісові залишки, траву, соломку пшениці, кукурудзяні стебла, енергетичну тростину, гній тощо. В Європейському Союзі близько 70% біогазових установок працюють на сировині аграрного походження.

На глобальному рівні сумарна встановлена потужність біогазових установок на кінець 2019 року становила приблизно 19,5 ГВт. Така динаміка зумовлена низькою вартістю та широкою доступністю біомаси, високою ціною викопного палива, а також зростаючою увагою до проблем глобального потепління. Анаеробне зброджування, що лежить в основі виробництва біогазу, сприяє збереженню природних ресурсів, захисту довкілля та зміцненню енергетичної безпеки держав.

На **рис. 1.2.11(а)** представлено розподіл видів сировини, яку використовують для виробництва біометану в європейських країнах. У більшості з них основною сировиною є органічні залишки та біовідходи, що відповідає вимогам ЄС щодо відновлюваного палива.

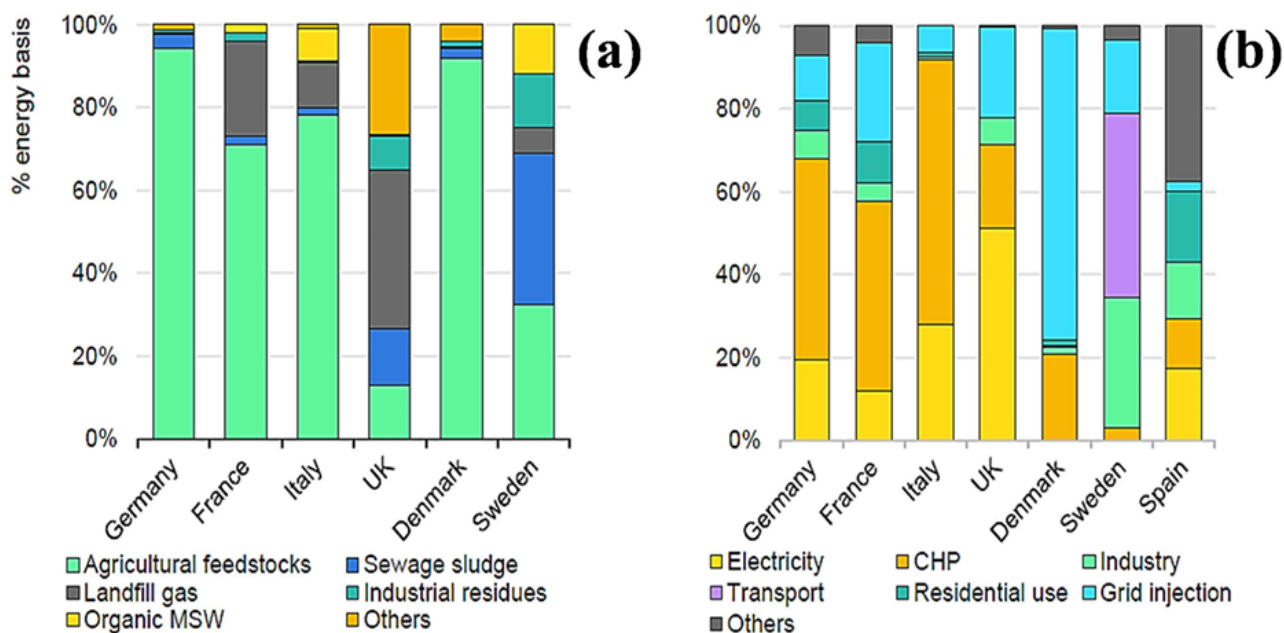


Рис. 1.2.11 (а) Частки сировини для виробництва біогазу та біометану в ЄС. (б) Кінцеві частки кінцевих користувачів виробленого біогазу в окремих країнах ЄС (IAE)

Натомість у Німеччині впродовж останнього десятиліття домінують енергетичні культури як джерело біогазу. Згідно з національною політикою, частка кукурудзи та зернових у виробництві біогазу наразі становить приблизно 40%. У Франції від використання енергетичних культур повністю відмовилися, зробивши ставку на гній та інші агровідходи.

Як показано на **рис. 1.2.11(б)**, у Німеччині, Франції та Італії біогаз переважно використовують для комбінованого виробництва тепла та електроенергії (когенерації). У Данії близько 80% біогазу спрямовується на задоволення побутових потреб населення. В Іспанії біогаз застосовується в різних галузях економіки, а у Швеції близько 30% — у промисловості та транспортному секторі.

1.2.5.2. Виробництво електроенергії та біометану з біогазу

Біогаз є перспективним джерелом для отримання електроенергії, тепла та біометану (bioCH_4), що може бути використаний як паливо для транспорту. Енергія з біогазу може застосовуватися в побуті, транспортних системах та як джерело електроенергії. Починаючи з 1980-х років, у багатьох країнах спостерігається стабільне зростання частки відновлюваних джерел енергії в структурі електрогенерації, зокрема біогазу, поряд із сонячною, вітровою та гідроенергією. Наприклад, у 2019 році виробництво біогазу досягло приблизно 45 ТВт·год на рік.

В умовах зростання попиту на енергію та виснаження запасів вугілля і природного газу, постає необхідність у пошуку більш чистих і економічно доцільних джерел енергії. Виробництво біогазу шляхом анаеробного зброджування органічної сировини є одним із таких рішень. Біогаз, як суміш метану (CH_4) і вуглекислого газу (CO_2), демонструє високу ефективність.

У низці досліджень, проведених в Ірані, вивчалася можливість виробництва «зеленої» електроенергії з біогазу, отриманого зі сільськогосподарських залишків та відходів тваринництва. Потенціал біогазу лише з відходів сільського господарства оцінюється на рівні понад 6,5 млрд м³, а з гною — понад 11,5 млрд м³ щороку. Було доведено, що навіть за наявності дешевої електроенергії та природного газу в країні, біогазові установки залишаються економічно доцільними.

1.2.5.3. Біогаз як паливо для транспорту

Біогаз, отриманий шляхом анаеробного зброджування, має широкий спектр застосувань. Його можна спалювати безпосередньо для виробництва теплової чи електричної енергії або очищувати до рівня біометану, придатного для використання як транспортне паливо або для подачі в систему природного газу.

Зростаючий попит на енергію внаслідок збільшення населення та обмеженість викопних ресурсів вимагають пошуку нових, екологічно безпечних рішень. Біометан у транспорті відіграє важливу роль у процесах декарбонізації. Його екологічну та економічну ефективність активно порівнюють із традиційними паливами у громадському транспорті, вантажоперевезеннях та судноплавстві. Очікується, що до 2030 року значна частина виробленого в ЄС біометану буде використана саме в автомобільному транспорті. У довгостроковій перспективі передбачається активне впровадження біометану й у морському секторі.

1.2.5.4. Біогаз для паливних елементів

На сьогодні близько 85 % енергетичних потреб світу задовольняються за рахунок викопного палива. Проте зростання викидів парникових газів і виснаження ресурсів стимулюють перехід до альтернативних джерел енергії. Окрім сонячної, вітрової, геотермальної та гідроенергії, перспективним напрямом є використання біогазу, отриманого з біомаси.

Безперервне надходження біомаси з полігонів, очисних споруд і сільськогосподарських відходів забезпечує надійне джерело сировини для генерації енергії. Виробництво біогазу сприяє отриманню екологічно чистого водню та зменшенню залежності від природного газу.

Паливні елементи (fuel cells, FC), зображені на **рис. 1.2.12**, є електрохімічними пристроями, які дозволяють здійснювати пряме перетворення палива на електричну енергію. Вони мають високий ККД (30–70 %) та мінімізують викиди. У таких системах водень, отриманий з біогазу, окислюється на аноді, електрони проходять через зовнішній контур до катода, де реагують з киснем, утворюючи воду. Таким чином утворюється електроенергія без процесу згоряння та шкідливих викидів.

Інтеграція паливних елементів із біогазовими установками (газифікація або анаеробне зброджування) забезпечує ефективне виробництво чистої енергії навіть із біогазу низької теплотворної здатності, отриманого з відходів.

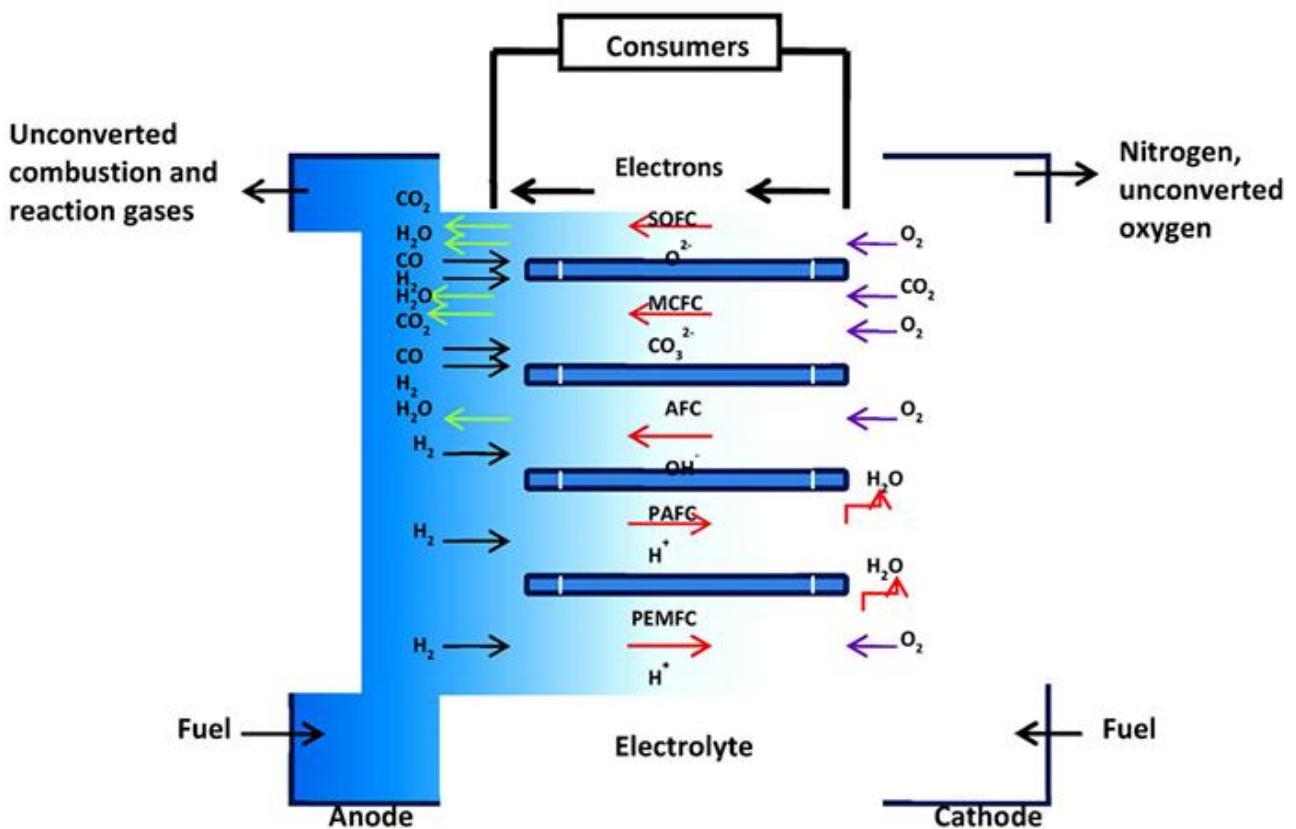


Рис. 1.2.12 Механізм роботи паливного елемента

1.2.5.5. Біогаз у сталому хімічному виробництві

Після десятиліть досліджень і практичного впровадження у промисловості загально визнано, що перетворення відходів на енергію є перспективною стратегією управління ресурсами. Біогаз вважається економічно доцільним і поновлюваним біопаливом. Його склад включає первинні та вторинні гази. До первинних належать метан (CH_4) у концентрації 50–60 % та вуглекислий газ (CO_2) — 40–50 %. До вторинних — слідові домішки, зокрема водень (H_2), сірководень (H_2S), водяна пара (H_2O) та силосани, які становлять лише 2–3 % об'єму.

Раніше викиди біогазу, зокрема метан і вуглекислий газ, вважались шкідливими відходами. Однак сьогодні їх розглядають як джерело відновлюваної енергії. У біогазовій галузі сформувалися дві основні бізнес-стратегії: безпосереднє перетворення в теплову енергію та виробництво поновлюваного пального. Окрім цього, існує третій напрям — трансформація біогазу у хімічні продукти з високою доданою вартістю.

Перетворення біогазу на корисні хімічні речовини, як-от оцтова кислота, метанол, олефіни та аміак, є багатообіцяючим способом зниження викидів парникових газів. Цей напрям поки що недостатньо досліджений, але має великий потенціал для хімічної промисловості. Наприклад, оцтова кислота може слугувати проміжним продуктом для подальшого синтезу інших сполук. Водень також може бути отриманий із біогазу за допомогою процесу парової конверсії.

Окрім цього, біогаз можна використовувати як середовище для піролізу, що дозволяє впливати на якість і вихід продуктів піролізу завдяки синергічному

ефекту відновлювального CH_4 і окисного CO_2 . Таке поєднання властивостей відкриває шлях до цілеспрямованого синтезу різноманітних хімікатів, включаючи оцтову кислоту, етилен і метанол, з використанням методів, як-от плазмова каталізована трансформація.

1.2.6. Поточна ситуація та перспективи розвитку

Станом на 2022 рік світове сумарне виробництво біогазу та біометану досягло понад 1,6 ексаджоулів (EJ), що на 17 % більше, ніж у 2017 році. Близько 50 % світового виробництва зосереджено в Європі. Найбільшим виробником є Німеччина (приблизно 20 % світового обсягу), далі йдуть Китай (21 %), США (12 %) та Індія (9 %). Згідно з ініціативою REPowerEU, Європейський Союз визначив орієнтир — 34 млрд m^3 виробництва біометану до 2030 року. Китай встановив аналогічну ціль на рівні 20 млрд m^3 . У 2023 році Данія досягла 37,9 % виконання цього плану, випереджаючи такі країни, як Іспанія та Бельгія, де сектор ще на стадії розвитку.

Технології біогазу забезпечують значні екологічні переваги, зокрема сприяють вирішенню проблем утилізації біовідходів, таких як харчові відходи, тверді побутові відходи, промислові та відходи тваринництва. Наприклад, анаеробне зброджування дозволяє використовувати дешеві види сировини з високим ефектом зниження викидів парникових газів. Разом з тим, потрібні подальші дослідження для підвищення електричної ефективності, зниження вимог до вмісту метану у біогазі, що використовується як паливо в поршневіх двигунах. Також існує необхідність у подовженні ресурсу паливних елементів і зменшенні вартості виробленої енергії для конкурентоздатності з двигунами внутрішнього згоряння.

Використання харчових та інших органічних відходів у процесі анаеробного зброджування сприяє збереженню азоту й фосфору, що є корисним у сільському господарстві та може зменшити потребу в неорганічних добривах. Переважна частина біогазових установок працює в середньо- та великомасштабному форматі на очисних спорудах або фермерських господарствах. У розвинених країнах також розповсюджені невеликі біогазові установки для домогосподарств.

Технологія анаеробного зброджування приносить користь різним соціальним групам, зокрема сільському населенню та фермерам, які мають доступ до органічних відходів тваринного і рослинного походження. У процесі переробки утворюється дигестат, який використовується як добриво. Одним із напрямів удосконалення галузі є використання побічного продукту біо CO_2 , наприклад, для фумігації зерна або створення модифікованої атмосфери в пакуванні.

Технологія power-to-gas вважається перспективною, хоча для її розвитку потрібно забезпечити доступ до дешевих джерел електроенергії — сонячної, вітрової тощо. В останні роки наукові дослідження зосереджено на синтезі метанолу та вищих спиртів із біогазу. Також активно вивчаються підходи до використання біогазу та біометану для генерації синтез-газу, який є цінною

сировиною для виробництва водню, диметилового ефіру, сечовини та спиртів. Значний науковий потенціал мають процеси каталізу біогазу до синтез-газу, а також отримання нановолокон вуглецю — матеріалів, які можуть застосовуватись у сонячних елементах, суперконденсаторах, транзисторах тощо.

Попри потенціал метанотрофів та ацетогенів у виробництві рідкого пального з метану, промислове використання цих мікроорганізмів залишається обмеженим. Промисловість біогазу та біометану має значний вплив на розвиток регіонів, зокрема створює робочі місця в сільській місцевості.

Існує також високий потенціал для переробки біомаси з утворенням H_2S , летких органічних сполук сірки, ароматичних сполук, кетонів, амінів і альдегідів. Крім того, у процесі розкладання білків з утворенням амінокислот викидається значна кількість аміаку — від 18 до 150 г на тонну осаду.

Серед основних викликів для ефективного виробництва біогазу залишаються: підвищення біорозкладності органічної сировини, її характеристика, розвиток бактеріальних консорціумів, удосконалення метанових виходів, збалансоване живлення та доступність ресурсів.

1.2.7. Висновки

У контексті глобальної енергетичної кризи багато науковців у різних країнах світу зосереджують зусилля на вдосконаленні технологій виробництва, підготовки та модернізації біогазу. Ефективне використання потенціалу біогазових технологій має стратегічне значення, оскільки може сприяти зменшенню викидів парникових газів і акумуляції вуглецю.

У цьому огляді розглянуто ключові сучасні підходи до виробництва біогазу, поточний стан галузі, а також перспективи її розвитку у світі. Так, у 2022 році близько 50 % усього виробленого біогазу припадало на Європу. Основними виробниками є Німеччина (≈ 20 % світового обсягу), Китай (21 %), США (12 %) та Індія (9 %). У Німеччині близько 90 % біогазу отримують з аграрної сировини. Аналогічна ситуація спостерігається у Франції (≈ 70 %), Данії (≈ 85 %) та Італії (≈ 80 %). Водночас у Великобританії основним джерелом є звалищний газ, на який припадає близько 40 % загального виробництва.

Дослідження показали, що попередня обробка сировини дозволяє підвищити вихід метану в межах від 25 % до 190 %. Наприклад, мембранне вилучення аміаку з гною свиней забезпечило зростання метанового потенціалу на 49 %, досягнувши $566,1 \pm 7,8$ мл CH_4 /г органічних речовин при використанні реактора з механічним перемішуванням.

Велику увагу дослідники приділяють екологічним технологіям підвищення якості біогазу з низьким енергоспоживанням. Серед них — біофіксація CO_2 мікрородоростями, використання мікробних електролітичних елементів, а також біоконверсія вуглекислого газу в метан із залученням водне-

окисних метаногенних мікроорганізмів. Завдяки цим підходам у процесі екзогенного апгрейду вдалося досягти вмісту метану понад 97 % при переробці осаду стічних вод.

Перспективні дослідження мають бути спрямовані на розробку економічно доступних та сталих технологій виробництва біогазу, оскільки більшість існуючих рішень залишаються або занадто витратними, або екологічно недосконалими.

2.1 ПОКРАЩЕННЯ БІОГАЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОЦЕСІВ АДСОРБЦІЇ: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СИМУЛЯЦІЙНИЙ ТА ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ ПІДХІД

Хімічний склад сирого біогазу значною мірою залежить від типу вихідної сировини, її джерела та доданих компонентів (наприклад, гною). У переважній більшості випадків основними складовими біогазу є метан (CH_4) і вуглекислий газ (CO_2). Крім них, у складі біогазу можуть бути присутні сірководень (H_2S), аміак (NH_3), азот (N_2), водень (H_2), чадний газ (CO), кисень (O_2) і водяна пара (H_2O). У разі використання осадів стічних вод чи побутових відходів, можуть траплятися леткі органічні сполуки та силосани — через наявність залишків косметичних і санітарних засобів.

Щоб отримати біометан, придатний для використання за технічними стандартами, необхідно очистити біогаз від домішок. До основних методів очищення належать: охолодження та кріогенне розділення, абсорбція для зневоднення, адсорбція (наприклад, на силікагелі, активованому вугіллі, алюмосилікатах), мембранні методи, а також біологічні способи (наприклад, для вилучення H_2S). Хоча основною метою є видалення кислотних газів, інші забруднювачі також можуть бути частково усунені у процесі очищення.

Усі відомі методи розділення газових сумішей можуть бути застосовані для модернізації біогазу, однак їх ефективність залежить від складу біогазу, масштабів виробництва, вимог до якості кінцевого продукту, а також економічних міркувань. На **рис. 2.1.1** представлено основні традиційні варіанти очищення біогазу.

Серед методів особливу увагу привертають адсорбційні процеси завдяки їхній універсальності, високій ефективності та здатності працювати у широкому діапазоні умов. Найбільш поширеними серед них є: адсорбція з перемиканням тиску (PSA), адсорбція з вакуумом (VPSA) і адсорбція з перемиканням температури (TSA). В основі кожного з них лежить відповідний спосіб регенерації адсорбенту: зниження тиску, вакуумування або підвищення температури. Ці методи ефективно видаляють CO_2 та інші домішки, демонструючи хорошу адаптивність до різних масштабів і режимів роботи.

Проектування адсорбційних систем значною мірою залежить від фізико-хімічних характеристик газової суміші, типу адсорбенту та механізму захоплення (кінетичного або рівноважного). Для видалення CO_2 та H_2S можуть застосовуватися обидва типи адсорбентів, однак для масового розділення доцільніше використовувати кінетичні.

У зв'язку з активним розвитком галузі, опубліковано чимало оглядових робіт, присвячених матеріалам, адсорбентам, методам очищення, оптимізації процесів, вибору технологій, екологічним та економічним аспектам. Попри це, комплексний огляд із застосуванням саме обчислювальних методів до процесів адсорбційного очищення біогазу досі відсутній. Саме цю прогалину й прагне заповнити дана робота.

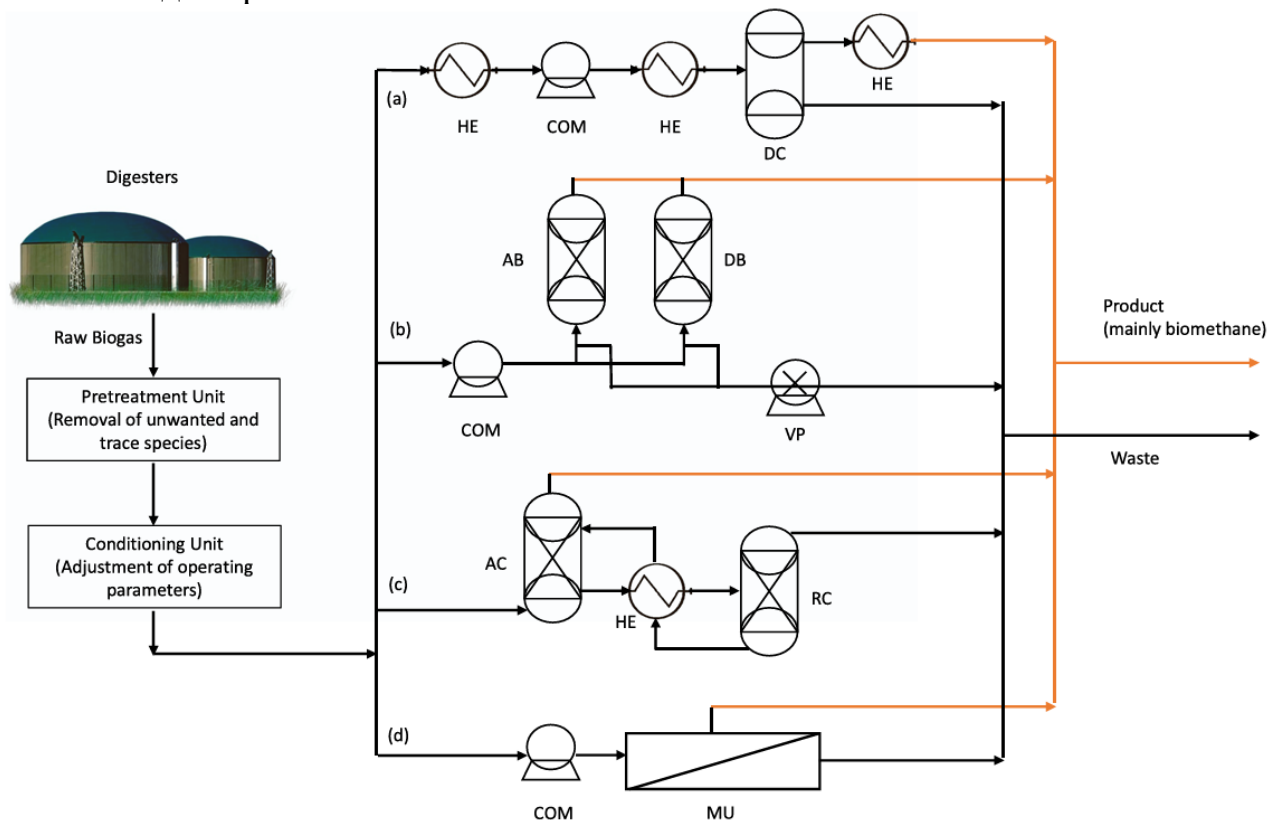


Рис. 2.1.1 Типові варіанти та технології очищення біогазу: а) криогенне розділення; б) адсорбція; с) абсорбція; д) мембранне розділення. Де: HE – теплообмінник, MU – мембранний модуль, COM – компресор, AC – адсорбційна колона, RC – колона регенерації, VP – вакуумний насос, AB – адсорбційний шар, DB – десорбційний шар, DC – колона ректифікації.

У представленому матеріалі розглянуто ключові технології адсорбційного типу та способи їхньої комп'ютерної оптимізації. Описано основні транспортні явища, механізми, рівняння, умови та параметри, що впливають на ефективність процесів. Також розглянуто можливості гібридизації та інтенсифікації процесів, а також наведено оцінку економічної доцільності різних сценаріїв з урахуванням технічних і фінансових аспектів.

2.1.2. Значення обчислювальних методів для очищення біогазу

Проектування та експлуатація будь-якого технологічного процесу є набагато ефективнішими та надійнішими за наявності достовірних математичних моделей, що враховують основні транспортні явища та динаміку системи. Такі моделі дозволяють прогнозувати роботу систем, проводити аналіз

ефективності та моделювати різні режими, зменшуючи залежність від тривалих і ресурсомістких експериментальних досліджень.

Математичне моделювання сприяє кращому розумінню матеріалів і процесів через інтерпретацію наявних даних. Зокрема, ці інструменти широко використовуються для вивчення впливу експлуатаційних параметрів на ефективність очищення біогазу, а також для оптимізації конфігурації процесів адсорбції — кількості колон/шарів, етапів циклу, тривалості регенерації, рециркуляції та ін.

Типовий підхід до моделювання адсорбційних процесів починається з вибору ізотерми рівноваги, яка описує взаємодію між адсорбентом і компонентами газу. У сфері очищення біогазу найбільш поширеними є ізотерми Ленгмюра, розширена модель Ленгмюра та багатосайтовий варіант Ленгмюра. Модель Ленгмюра застосовується до індивідуальних компонентів і ґрунтується на припущенні, що кожен активний центр може зв'язувати лише одну молекулу. Розширена модель дозволяє працювати зі сумішами, а багатосайтовий підхід враховує можливість одночасної адсорбції на декількох центрах.

Альтернативним підходом до моделювання багатоконпонентної адсорбції є теорія ідеального адсорбованого розчину (IAST), яка враховує конкурентну адсорбцію компонентів суміші на поверхні та базується на термодинамічній рівновазі поверхневого натягу кожного компонента.

Окрім ізотерм, необхідні також кінетичні моделі, які враховують різні механізми дифузії (молекулярну, Кнудсена, макро- та мікропористу). Далі формулюється система диференціальних рівнянь, що описують баланси маси, імпульсу та енергії. Для їх вирішення застосовуються відповідні граничні умови. Залежно від задачі, можливе спрощення моделі, наприклад: припущення ідеальності газу, адіабатичності, усталеності потоку тощо. Однак такі спрощення мають бути обґрунтованими, оскільки невірні припущення можуть суттєво вплинути на результати моделювання.

У системах з пористими структурами передбачено використання окремих моделей для різних ділянок переносу — в об'ємі газу, у макро- і мікропорах, а також на поверхні частинок. Наприклад, модель з лінійною рушійною силою (LDF) або її удосконалена версія — бі-дисперсна LDF (bi-LDF), яка враховує дифузію в макропорах гранул і в кристалічній структурі.

Окрему увагу приділяють рівнянням теплового балансу в газовій і твердій фазах. Усі рівняння формалізуються та розв'язуються в обчислювальному середовищі з урахуванням ключових критеріїв продуктивності. Точність результатів значною мірою залежить від обраного алгоритму розв'язання й платформи для моделювання.

Так, наприклад, Ніколіч та колеги розробили універсальну модель для опису процесу розділення газів у багатосарових PSA-установках, реалізовану в середовищі gPROMS. У цій моделі враховано всі основні механізми переносу та експлуатаційні режими. Результати моделювання (на прикладі процесу виділення водню) добре корелювали з експериментальними даними. Такий підхід може бути адаптований і для задач очищення біогазу.

Крім того, Бітцер побудував модель відстеження динаміки неізотермічного адсорбційного процесу, використовуючи нелінійне розподілене параметричне моделювання фіксованого шару та поєднання нелінійного передбачувального керування з лінійним зворотним зв'язком для контролю таких параметрів, як чистота кінцевого продукту. Цей підхід може бути застосований для оптимізації конфігурацій PSA-установок при очищенні біогазу.

У сучасних умовах, коли зростають вимоги до ефективності біогазових установок, комп'ютерне моделювання дозволяє не лише оцінювати й удосконалювати процес, але й уникати складнощів експериментального аналізу, зокрема у вивченні впливу часу циклу на тиск і концентрацію газових потоків. Математичне моделювання також дає змогу швидко порівнювати різні варіанти конфігурацій, що в польових умовах було б складним або економічно не вигідним.

Завдяки сучасним підходам та інструментам, математичне моделювання процесів адсорбції при очищенні біогазу набуло широкого застосування. **Рис. 2.1.2** демонструє узагальнення використання обчислювальних методів у цій сфері, включаючи типи адсорбентів, застосовуваних для розділення різних газових сумішей.

Category	Adsorbents	Target Separation
Molecular Modeling and Machine Learning Methods	Zeolites : FAU Faujasite, NaX, NaY, LTA, MFI, ITQ-29	H ₂ S/CO ₂ /CH ₄ & CO ₂ /CH ₄
Pressure Swing Adsorption (PSA)	Zeolite 13X, Zeolite 5A, CMS 3K, CMS KP 407, MOF Basolite A100	H ₂ S/CO ₂ /CH ₄ & CO ₂ /CH ₄
Vacuum Pressure Swing Adsorption (VPSA)	Zeolite 13X, CMS 3K, CMS 3K, MOF -508b	CO ₂ /CH ₄
Temperature Swing Adsorption (TSA)	Lewatit® VP OC 1065 (Amine-based sorbent)	CO ₂ /CH ₄
Trace Removal in Fixed Adsorption Beds	LG700PA, LF900A, LL900A	H ₂ S/CH ₄

Рис. 2.1.2 Огляд обчислювальних методів та процесів адсорбції для покращення біогазу

2.1.3. Молекулярне моделювання та машинне навчання

Методи молекулярних обчислень знаходять широке застосування в різних наукових галузях. Особливо швидкий прогрес у сфері молекулярного моделювання та інструментів для симуляцій за останні роки сприяв зростанню інтересу до їх використання для дослідження та оптимізації процесів, пов'язаних із вилученням та очищенням біогазу. Одним із ключових етапів при розробці адсорбційних технологій є аналіз таких характеристик адсорбенту, як селективність, ємність, ізотерми поглинання, термодинаміка та ефективність щодо певного компонента.

Молекулярне моделювання дозволяє оцінити ці параметри на молекулярному рівні та глибше зрозуміти механізми взаємодії, що керуються законами класичної термодинаміки. Незважаючи на обмежену кількість досліджень у сфері молекулярного моделювання саме для задач апгрейду біогазу, результати свідчать про значний потенціал цього підходу.

Так, Cosoli та співавт. провели моделювання процесу вилучення сірководню (H_2S) з біогазу з використанням низки цеолітів. У дослідженні використовували метод Монте-Карло в великому канонічному ансамблі (GCMC) для чотирьох типів цеолітів: NaX, NaY (типу фожазиту), LTA (цеоліт А) та MFI (Zeolite Socony Mobil – five). NaX, NaY та LTA мають гідрофільний характер, тоді як MFI є гідрофобним, що дозволило порівняти їх ефективність. За результатами симуляцій та експериментів найкращі результати для поглинання H_2S продемонстрував цеоліт NaY, тоді як його ефективність при роботі з сумішшю біогазу суттєво знижувалася. Це свідчить про важливість урахування складу газу при виборі адсорбенту.

Симуляції також виявили, що при роботі з гідрофільними цеолітами поглинання H_2S зростає зі збільшенням його парціального тиску. Як показано на **рис. 2.1.3**, найвища селективність до H_2S спостерігалась при його низькому парціальному тиску. У той час як завантаження CH_4 залишалося стабільним, поглинання H_2S незначно зростало, а CO_2 — знижувалося. Це підтверджує перевагу гідрофільних цеолітів над гідрофобними.

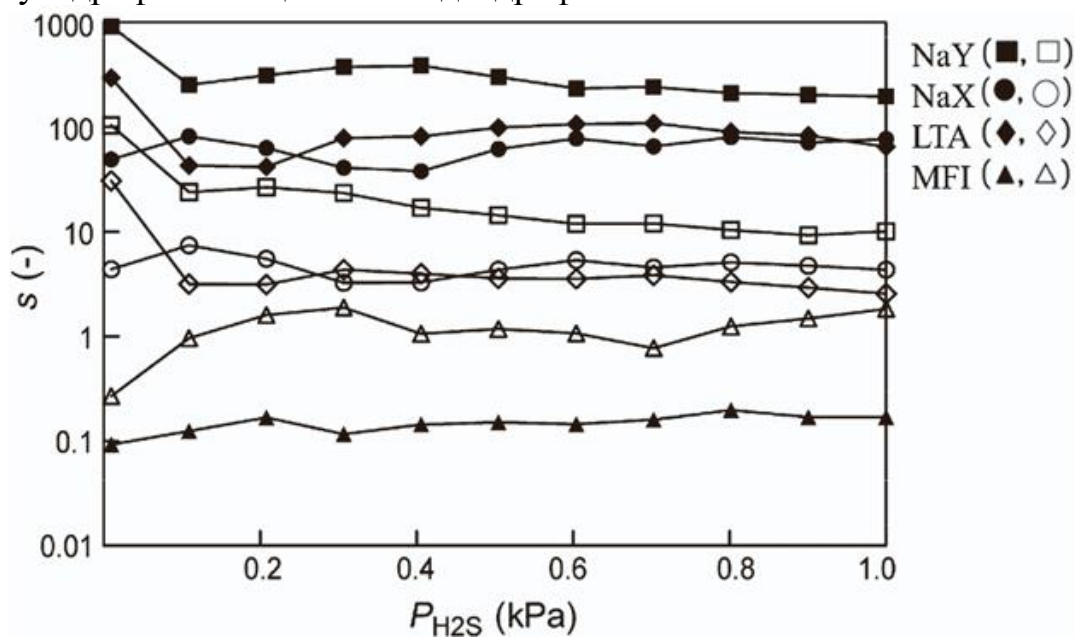


Рис. 2.1.3 Коефіцієнт селективності для H_2S відносно CH_4 (чорні символи) та CO_2 (білі символи) для чотирьох типів досліджуваних адсорбентів

Крім того, використання моделювання на основі квантової механіки дало змогу оцінити структурні характеристики та заряди адсорбентів, що допомогло пояснити отримані результати. Модель дозволяє конфігурувати суміші з CO_2 та H_2S , відкриваючи перспективи для вивчення біогазу з різним складом та походженням.

Подальші дослідження розширили підхід GCMC і поєднали його з молекулярною механікою (ММ) та молекулярною динамікою (МД) для моделювання поведінки H_2S у присутності CO_2 . При цьому моделювання проводилось для трьох рівнів заповнення комірки NaY (1/3, 2/3 і 1) у широкому діапазоні парціального тиску H_2S (від 10 до 1000 Па). Використано ансамблі NVT та NVE для збереження геометрії комірки та термодинамічної рівноваги системи відповідно.

Результати симуляцій підтвердили ефективність NaY для вилучення H_2S . Із зростанням парціального тиску збільшувалась і кількість поглиненого H_2S , що пояснюється конкуренцією між молекулами H_2S та CH_4 за активні центри. Як показано на **рис. 2.1.4**, молекули H_2S залишалися в пористій структурі цеоліту, тоді як CO_2 мав тенденцію швидше залишати пори, перебуваючи в стані осциляції. Це ще раз підтверджує високу спорідненість полярних молекул H_2S до гідрофільних адсорбентів.

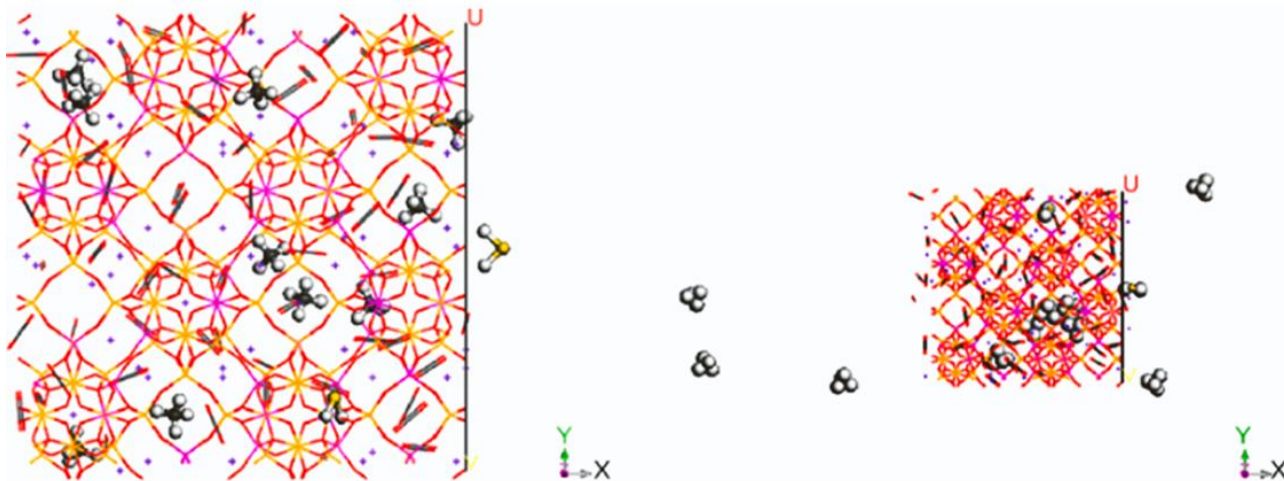


Рис. 2.1.4 3D-візуалізація 2D-періодичної комірки за початкових умов (ліворуч) та після 6 пс МД-моделювання (ансамбль NVE, праворуч); $P(\text{H}_2\text{S}) = 10$ Па, повне навантаження. Молекули CH_4 , що виходять з комірки, представлені сіро-білим кольором.

Загалом, адсорбція H_2S краще відбувалася при підвищеному тиску, а як завантаження, так і склад вхідного газу істотно впливають на ефективність процесу. Моделювання такого типу дозволяє оптимізувати вибір матеріалів для апгрейду біогазу та спрямовувати експериментальні дослідження у найбільш перспективні напрями.

Ще одним перспективним напрямом удосконалення процесів апгрейдування біогазу є застосування методів машинного навчання. Цей підхід базується на обробці великих обсягів експериментальних і теоретичних даних з метою виявлення трендів, що дозволяють здійснювати прогнозування ефективності очищення біогазу. Машинне навчання надає можливість проводити точніший аналіз, здійснювати скринінг широкого спектра адсорбентів та оцінювати їхню придатність до конкретного процесу.

Ефективність цього підходу значною мірою залежить від обсягу й якості вхідних даних. Розширення баз даних, отриманих з різних джерел — як

експериментальних, так і чисельних — суттєво підвищує точність моделювання. Один із нещодавніх прикладів застосування цього підходу — розробка алгоритму під назвою OCEAN, створеного Хараїсом-Арройо для прогнозування ефективності процесу адсорбційного очищення біогазу в установці PSA (рис. 5).

Цей алгоритм було протестовано на двох комерційних цеолітних адсорбентах — MFI і ITQ-29. Спочатку за допомогою обчислювальних методів проводилося апроксимування ізотерм адсорбції, після чого на основі отриманих тенденцій створювалися додаткові ізотерми в межах заданих робочих параметрів. Для дослідження були обрані діапазони тиску $0.1\text{--}1 \times 10^6$ Па та температури 200–400 К — відповідно до типових можливостей обладнання й прийнятних витрат.

Як показано на **рис. 2.1.5**, розподіл пор у структурах адсорбентів пояснює меншу селективність ITQ-29 у порівнянні з MFI. Завдяки меншому діаметру каналів, адсорбент MFI забезпечує кращу селективність до CO_2 за нижчого тиску, тоді як більші порожнини ITQ-29 зменшують ефект селективного екранування за розміром молекул. Найвища селективність спостерігалася при температурі 200 К і тиску 10^3 кПа, причому значення селективності CO_2/CH_4 становило 171.4 для MFI проти 103.2 для ITQ-29, що свідчить про перевагу структури MFI в умовах низької температури й помірному тиску.

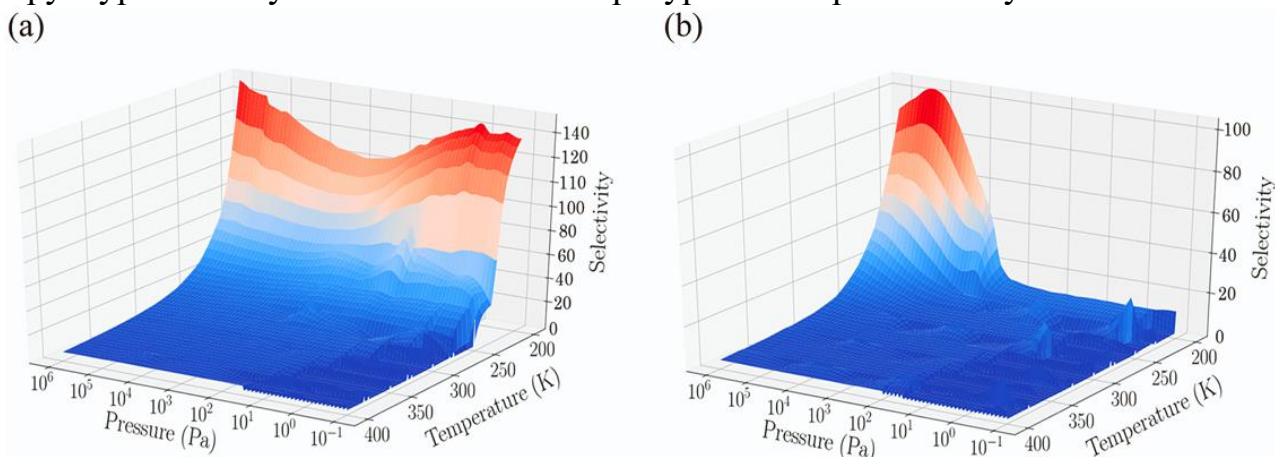


Рис. 2.1.5 Порівняння селективності адсорбції CO_2/CH_4 у цеолітах (а) MFI та (б) ITQ-29 у реальних діапазонах робочого тиску та температури

Алгоритм OCEAN також дозволяє будувати повні карти адсорбції в координатах тиск–температура, використовуючи вихідні ізотерми для окремих компонентів, а потім застосовувати модель IAST (Ideal Adsorbed Solution Theory) для сумішей, що дає змогу обирати оптимальний адсорбент і режим роботи. Цей підхід можна ефективно застосовувати не лише для очищення біогазу, а й для суміжних процесів, значно зменшуючи потребу в експериментальних дослідженнях, витратах часу та ресурсів.

2.1.4. Адсорбційне осушення біогазу за технологією змінного тиску (Pressure Swing Adsorption, PSA)

Серед адсорбційних методів очищення газів, технологія PSA (Pressure Swing Adsorption) є найпоширенішою, що підтверджується її широким застосуванням у таких сферах, як очистка природного газу, розділення повітря, очищення водню та інших процесах у галузі енергетики й охорони довкілля. PSA-установки ефективні для малих та середніх обсягів очищення газу — від 400 до 15 000 м³/добу.

До основних переваг цієї технології належать компактність, відносно низькі капітальні витрати та споживання енергії, високий рівень безпеки, простота експлуатації, а також здатність забезпечити високий ступінь очищення — усі ці чинники є визначальними при прийнятті рішень щодо доцільності впровадження процесу.

Робота PSA-установок базується на принципах рівноважної та кінетичної адсорбції. У випадку рівноважної адсорбції ефективність розділення залежить від різниці в здатності адсорбенту зв'язувати певні компоненти газової суміші. Зазвичай, компонент із найменшою спорідненістю до адсорбенту (легший або менший за розмірами) виділяється з найвищою чистотою.

Кінетична адсорбція ґрунтується на різниці у швидкості дифузії молекул крізь пористу структуру адсорбенту. У цьому випадку компонент, що має найнижчу швидкість дифузії (більший або важчий), концентрується у продукті з найвищим ступенем очищення.

Вибір типу адсорбенту в PSA-процесі має відповідати меті розділення. Для рівноважної адсорбції зазвичай застосовуються цеоліти, активоване вугілля, а також на лабораторному рівні — метал-органічні каркаси (MOF). Для кінетичного механізму найчастіше використовуються вуглецеві молекулярні сита (CMS). Рівноважні адсорбенти дозволяють ефективніше використовувати об'єм активної фази і досягати вищої продуктивності, тоді як кінетичні адсорбенти забезпечують розділення таких сумішей, які не можна розділити методами рівноважної адсорбції.

На відміну від багатьох стаціонарних технологій, PSA працює в динамічному режимі з чітко визначеними циклами та етапами. Тому велике значення має оптимальна конфігурація всіх компонентів системи, черговість і тривалість циклів, щоб забезпечити бажаний рівень очищення та вихід біометану. Незважаючи на те, що PSA вважається зрілою технологією для очищення біогазу, вона залишається доволі витратною, особливо коли потрібно досягти якості палива, придатного для використання як біометан. Це особливо помітно при роботі на малих об'ємах, коли вартість зростає через низький рівень утилізації метану та втрати CH₄ у побічному потоці, що потребує додаткових ступенів доочистки.

Питання зниження капітальних та експлуатаційних витрат PSA-установок, особливо для обсягів менше 400 м³/добу, залишається однією з ключових задач для науковців.

Незважаючи на численні експериментальні та польові дослідження PSA-технологій, обчислювальні підходи залишаються відносно слабо розвиненими. Протягом останніх трьох десятиліть досягнуто значного прогресу, але все ще не

існує єдиної теоретичної бази, яка б дозволила точно моделювати ефективну PSA-установку з урахуванням циклів та параметрів. Водночас поява нових міждисциплінарних методів, таких як нейронні мережі, машинне навчання, молекулярне моделювання та моделі, побудовані на основі даних, відкриває перспективи для прориву у цьому напрямку. Саме такі новітні інструменти вже почали використовуватись у сфері очищення біогазу, що дає надію на покращення технологій.

У майбутніх дослідженнях варто зосередитися на вирішенні таких питань, як:

- оптимізація параметрів конструкції та режиму роботи,
- спрощення інтеграції складних математичних моделей,
- вибір адсорбентів і конфігурація колон,
- визначення та оптимізація циклів, етапів та показників ефективності (чистота, утилізація, втрати, енергоспоживання).

Аналіз наявних досліджень свідчить, що моделювання та симуляція PSA-технологій зосереджуються на таких аспектах:

- чистота, утилізація та втрати основного продукту;
- якість побічних потоків;
- ефективність установки загалом і кожного етапу зокрема;
- вибір між рівноважною та кінетичною селективністю;
- питомі витрати енергії;
- кількість, тип і послідовність колон, етапів та циклів;
- одно- та багатоступенева конфігурація;
- наявність контурів рециркуляції та продувки;
- чутливість до зміни параметрів процесу;
- характеристика та критерії вибору адсорбенту;
- вплив параметрів експлуатації: склад сировинного біогазу, домішки, тривалість циклів, розмір та завантаження адсорбенту, співвідношення продувки до подачі, тиск адсорбції та десорбції, довжина зони масообміну тощо;
- розміри основних елементів установки (діаметр і висота колон, об'єм, тощо).

Комплексне дослідження було присвячене моделюванню процесу PSA з використанням цеоліту 13X і CMS 3K як представників відповідно рівноважного та кінетичного типів адсорбентів. Метою було отримання біометану з чистотою не менш як 98 %, придатного для використання як відновлюваного палива. У симуляціях розглядалися як одно-, так і багатоколонні конфігурації, а також аналізувалася ефективність застосування рециркуляційних потоків. Система математичних рівнянь, використана в дослідженні, представлена в таблиці 2. Ключові результати цього дослідження розглядаються далі.

Одним із дієвих підходів до підвищення ефективності PSA-установок є оптимальне налаштування конфігурації колон і циклів. Це може забезпечити зменшення габаритів обладнання, а отже – зниження капітальних та експлуатаційних витрат. Зокрема, у процесі очищення біогазу було запропоновано нову схему колон за концепцією "ведуча-тримінгова" (lead-trim),

що покращує використання адсорбенту. Ця конфігурація передбачає послідовне з'єднання колон для збільшення часу контакту газу з адсорбентом через розширення зони масопередачі (MTZ) від першої колони (ведучої) до другої (тримінгової) і може застосовуватись як для рівноважних, так і для кінетичних процесів. Проте, було встановлено, що ця концепція забезпечує вищу ефективність для кінетичних процесів, зокрема з огляду на енергоспоживання та розміри установки.

Конфігурації циклів для цієї системи зображені на **рис. 2.1.6(a)** (базовий цикл) і **рис. 2.1.6(b)** (цикл із продуванням при підвищеному тиску). При використанні цеоліту 13X спостерігалось швидке дифузійне проникнення, але тривала зона MTZ через теплові ефекти, викликані високою теплою адсорбції CO₂. У свою чергу, CMS 3K мав повільну дифузію метану. Після досягнення прориву у ведучій колоні газ спрямовувався до тримінгової колони, що дозволяло додаткову адсорбцію важких компонентів і покращення ефективності процесу. Обидва адсорбенти забезпечували чистоту CH₄ понад 98 %. Конфігурація "lead-trim" підвищила продуктивність цеоліту 13X, хоча меншою мірою, ніж у CMS 3K. При використанні цеоліту спостерігалися значні температурні коливання, пов'язані з адсорбцією/десорбцією CO₂. CMS 3K дозволив обробити більшу кількість сировини завдяки більшій активній зоні, що зумовило вищу продуктивність при втраті метану не більш як 5,5 моль·кг⁻¹·год⁻¹. Потужність споживання становила 0,074 кВт·моль⁻¹ CH₄. Водночас рециркуляція негативно впливала на чистоту. Для двоколонної системи з цеолітом 13X підвищення температури сприяло покращенню чистоти, ступеня вилучення та зниженню енергоспоживання (до 99 %, 85 % і 0,12 кВт·моль⁻¹ відповідно).

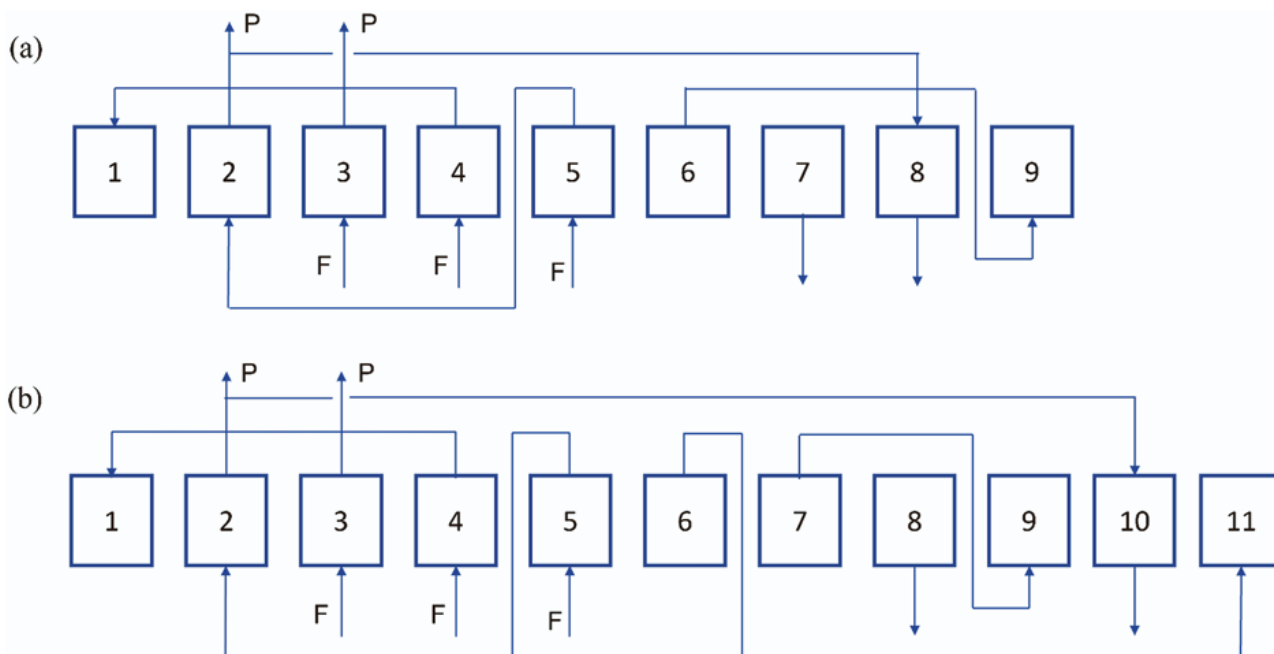


Рис. 2.1.6 (a) 9-крокова та (b) 11-крокова конфігурації циклу, запропоновані для моделювання та симуляції покращення біогазу в процесі PSA

В іншому дослідженні було розроблено процес PSA на основі CMS KP-407 як кінетичного адсорбенту. Для моделювання ефективності PSA-системи з двома колонками використовувалась система рівнянь, представлена в таблиці 2. Адсорбційна рівновага для чистих компонентів описувалась за багатосайтовою моделлю Ленгмюра з урахуванням дифузії за моделлю подвійного опору. Як сировина використовувалась бінарна суміш CH_4/CO_2 (60/40 %) при коливанні тиску від 5 до 1 бар. Результати моделювання узгоджувались з експериментальними даними. Була досягнута чистота понад 97,5 % та ступінь вилучення 93,8 %. Встановлено, що перенос CO_2 контролювався мікропористою дифузією, тоді як транспорт CH_4 — дифузією через поровий вхід.

Як показано на **рис. 2.1.7**, чистота метану та положення MTZ для CO_2 регулювались тривалістю подачі. Збільшення часу подачі в діапазоні 2–7 хв призводило до стрімкого зростання чистоти метану. Подальше збільшення часу подавало лише поступове зростання. Ступінь вилучення покращувався за рахунок введення стадії продувки, при цьому чистота залишалася незмінною. На **рис. 2.1.7** також показано значну різницю між результатами моделювання процесу без стадії продувки та експериментальними даними або моделюванням з урахуванням цієї стадії.

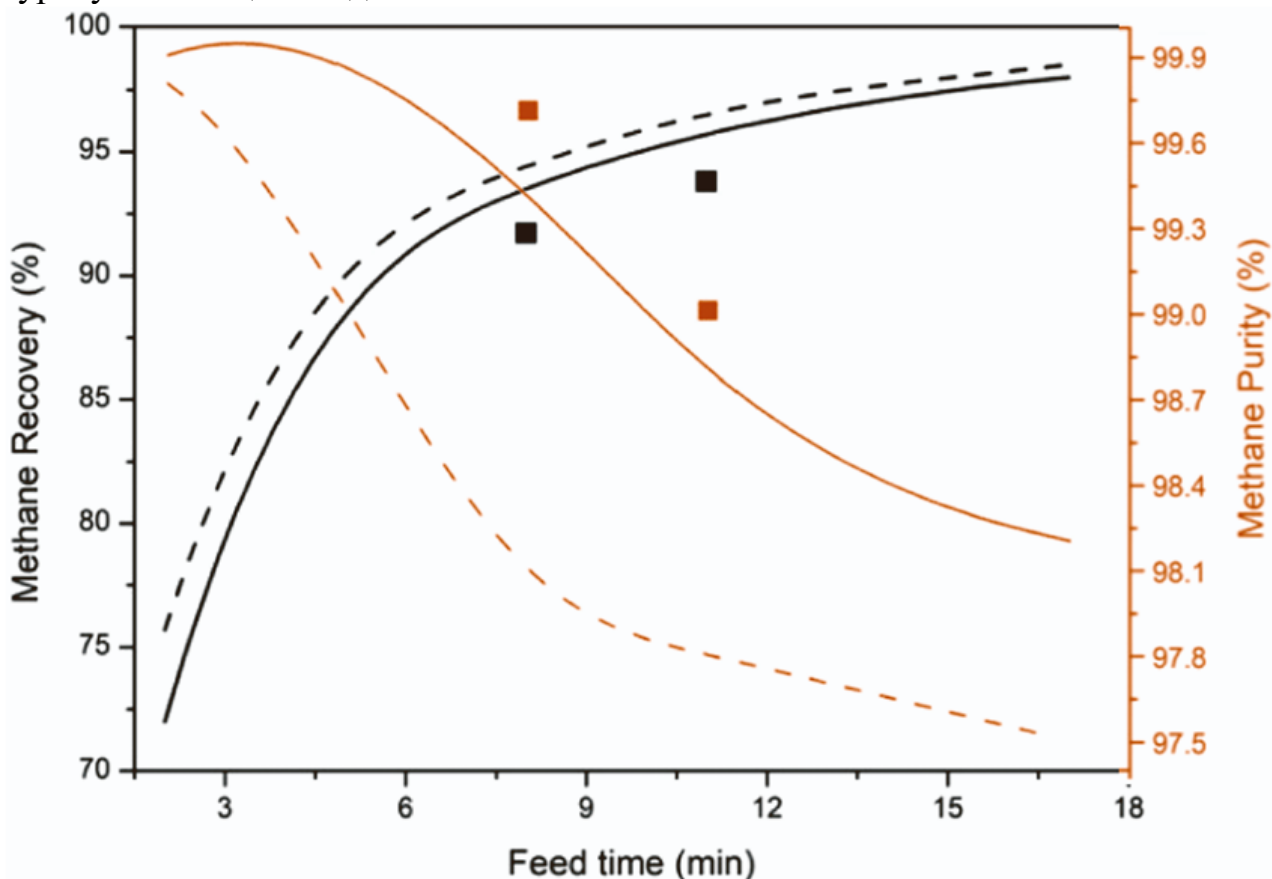


Рис. 2.1.7 Зміни у вилученні CH_4 (чорна ліва вісь) та чистоті (помаранчева права вісь) за різних часів подачі для процесу PSA, заповненого адсорбентом CMS KP-407 (■ Експериментальні дані; — Модельовані дані без етапу продувки; – Модельовані дані з етапом продувки)

Ауджеллетті та співавт. запропонували нову конфігурацію установки PSA для очищення біогазу, яка складалася з двох послідовно з'єднаних блоків. Така конфігурація дозволила одночасно підвищити ступінь вилучення метану та зменшити його втрати. Основною метою було отримання біометану, придатного для подачі в газорозподільні мережі, із високим виходом метану, а також створення додаткового потоку майже чистого CO₂ (>99%), придатного для використання в хімічних, біохімічних процесах, як охолоджувач або як надкритичний флюїд.

В якості сировини використовували сирий біогаз із витратою 100 нм³/год, що містив 60% CH₄ та 40% CO₂ при тиску 1 атм, подібний до умов малих біогазових установок. Процес базувався на використанні цеоліту 5A як рівноважного сорбенту, що заповнював обидва блоки, кожен із яких складався з 4 взаємопов'язаних колон. Як показано на **рис. 2.1.8**, біогаз спочатку подавався до першого блоку для виробництва біометану. Побічний газ із цього блоку спрямовувався у другий для видалення CO₂, після чого повертався до першого блоку для підвищення ступеня утилізації CH₄.

Було розроблено динамічну неізотермічну модель, у якій кінетика адсорбції та десорбції описувалась за допомогою узагальненого транспортного параметра. Набір диференціальних рівнянь у частинних похідних було вирішено з урахуванням відповідних граничних умов. Ефективність процесу оцінювали за чистотою потоків CH₄ і CO₂, ступенем вилучення метану, а також за енергоспоживанням. Спочатку симуляції виконувалися для однієї колони, а потім модифікувалися з урахуванням рециркуляційних потоків.

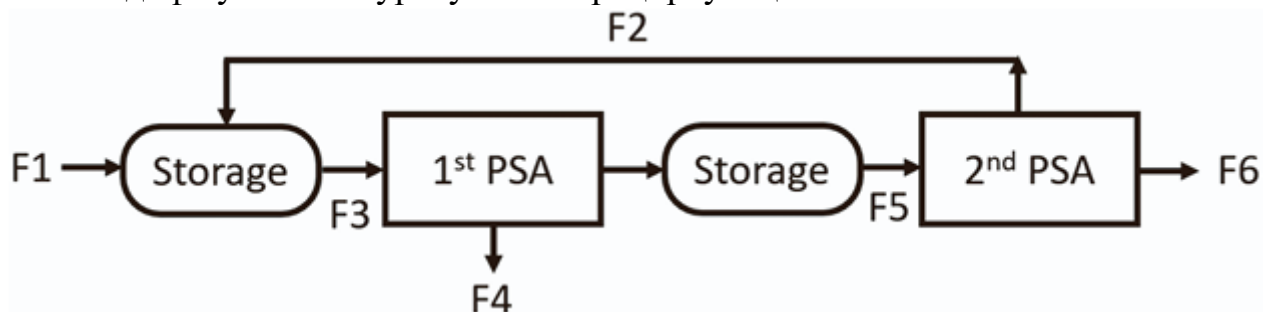


Рис. 2.1.8. Схема запропонованої конфігурації процесу та відповідних робочих умов і результатів продуктивності для очищення біогазу в установці PSA з використанням цеоліту 5A

За даними, наведеними на **рис. 2.1.8**, перший блок PSA забезпечував вилучення метану майже на рівні 84%, а другий — 97%. Завдяки поєднанню обох блоків загальний ступінь утилізації CH₄ перевищив 99%. При цьому чистота потоків CH₄ (F4) та CO₂ (F6) досягла відповідно 98,7% та 0,86%, що свідчить про отримання високочистих компонентів. Загальне питоме енергоспоживання процесу становило 1250 кДж/кг біометану.

Одним із підходів до оптимізації процесу є використання рециркуляційних потоків. Сантос та співавт. досліджували ефективність PSA-установки за наявності рециркуляції, з метою досягнення чистоти біометану понад 98% при високій утилізації. Дослідження проводилися як для одноступеневого, так і для

двоступеневого PSA-процесу, кожен з яких містив по 6 етапів і був заповнений цеолітом 13X, як показано на **рис. 2.1.9**.

Математична модель була побудована на основі системи диференціальних рівнянь і валідувалася за допомогою експериментальних даних. Для моделювання використовували модифікований цикл Скарстрьома з різними граничними умовами. Було встановлено, що використання двоступеневого PSA-процесу дозволяє досягати чистоти метану понад 99% та ступеня утилізації понад 85%. Питоме енергоспоживання при цьому знижувалося до $0,12 \text{ кВт} \cdot \text{моль}^{-1} \text{ CH}_4$, а продуктивність становила $5,9 \text{ моль/кг} \cdot \text{год}$. Було також встановлено, що зниження чистоти рециркуляційного потоку призводить до зниження загальної чистоти продукту. Окрім того, включення етапу вирівнювання значно покращило загальну ефективність процесу PSA.

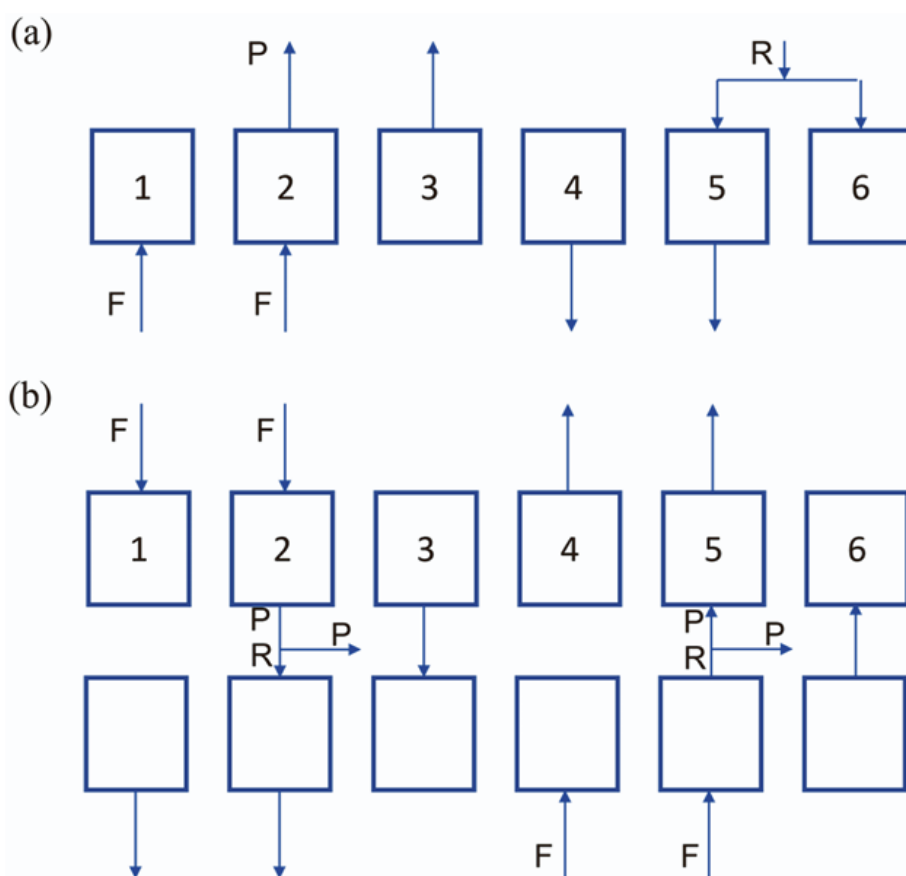


Рис. 2.1.9 Схеми циклів для (а) одноколонної та (б) двоколонної (двох) установки PSA, заповненої цеолітом 13X (F: сировина, P: продукт, R: vRecycle)

Для ефективного моделювання PSA-процесів важливе розуміння динамічної поведінки системи та впливу змінних параметрів, що варіюються залежно від умов. Одним із прикладів є зміна складу біогазу, яка може виникати внаслідок змін у технології або складі сировини. З метою розробки стратегії керування було проведено моделювання PSA-установки з використанням цеоліту 13X при широкому діапазоні змін вхідних параметрів.

У моделі розглядалася можливість застосування термопар як доступнішої альтернативи газоаналізаторів для моніторингу змін у складі адсорбованих

речовин у колоні. Експериментальні дані підтвердили точність моделі. Показано, що зміна витрати та складу на вході всього на 5% спричиняє суттєве зростання температури в колоні та зміщення фронту концентрації CO₂. Найбільші зміни спостерігались у першому циклі після порушення стабільного режиму. Врешті-решт, доведено практичну доцільність, ефективність і економічні переваги використання термопар для зворотного зв'язку в процесі PSA.

Щоб визначити оптимальні параметри експлуатації, що забезпечують чистоту продукту понад 97%, Кім і співавт. запропонували чисельну модель PSA-установки з 4 колон, заповнених CMS FB (вуглецевим молекулярним ситом). Кінетичні параметри та пористість (0,3) були визначені шляхом апроксимації експериментальних даних. Константи масопереносу становили 0,0005 с⁻¹ для CH₄ і 0,03 с⁻¹ для CO₂.

Було показано гарну відповідність між розрахунковими й експериментальними результатами. Аналіз чутливості засвідчив, що оптимальна селективність становить 1,9. Збільшення тиску адсорбції підвищувало чистоту продукту, але знижувало ступінь утилізації через збільшені втрати на стадії продування. Також із підвищенням співвідношення P/F (тиск/витрата) чистота зростала, однак із втратою виходу. Як показано на **рис. 2.1.10**, збільшення довжини шару адсорбенту сприяло зростанню молярної частки CH₄ на виході колони. Важливою перевагою запропонованого підходу було те, що чистоту можна було оцінювати окремо для кожного етапу процесу.

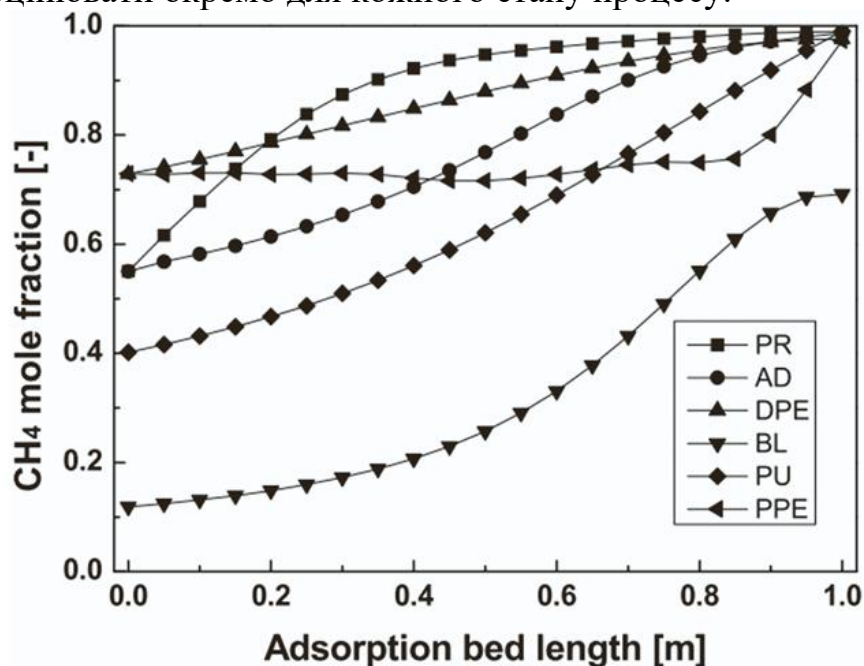


Рис. 2.1.10. Зміни мольної частки CH₄ у циклічному стаціонарному стані при зміні довжини адсорбційного шару, проаналізованих за допомогою числової моделі для різних етапів (PR: етап підвищення тиску, AD: етап адсорбції, DPE: етап вирівнювання тиску, BL: етап продувки, PU: етап продувки та регенерації вакууму, PPE: етап вирівнювання тиску)

Для маломасштабного очищення біогазу Canevesi та ін. розробили декілька спрощених і доступних технологічних схем на основі PSA-установки з двома або

трьома колонами, заповненими CMS-адсорбентами. У дослідженні вивчали вплив різних конфігурацій для встановлення залежностей між вхідними параметрами та показниками ефективності. Склад сировинної газової суміші становив CO_2/CH_4 (40/60 %), а тиск коливався від 5 до 0,1 бар під час стадій адсорбції та регенерації відповідно. Для опису всієї PSA-установки (колон, резервуарів і клапанів) було використано систему рівнянь, що дозволило здійснити прогнозний аналіз і провести валідацію на основі експериментальних даних. Буферний резервуар був врахований у моделі з метою забезпечення безперервної роботи, однак він не мав впливу на продуктивність процесу.

Результати показали, що чистота CH_4 , ступінь його вилучення, продуктивність і енергоспоживання залежать від тривалості подачі газу. Тенденції зміни енергоспоживання, представлені на **рис. 2.1.11**, засвідчили, що при довшій тривалості подачі (15 хв) споживання енергії було меншим, оскільки за цикл вироблялося більше газу. Також споживання енергії зменшувалося зі збільшенням об'єму буферного резервуару, що особливо помітно на менших об'ємах. Відсутність стадії продувки зменшувала чистоту продукту та водночас підвищувала енергоспоживання. Загалом, обидві конфігурації – з двома й трьома колонами – виявилися придатними для досягнення високої чистоти CH_4 ; при цьому у трьохколонному варіанті досягалися ще кращі показники відновлення та менші втрати метану.

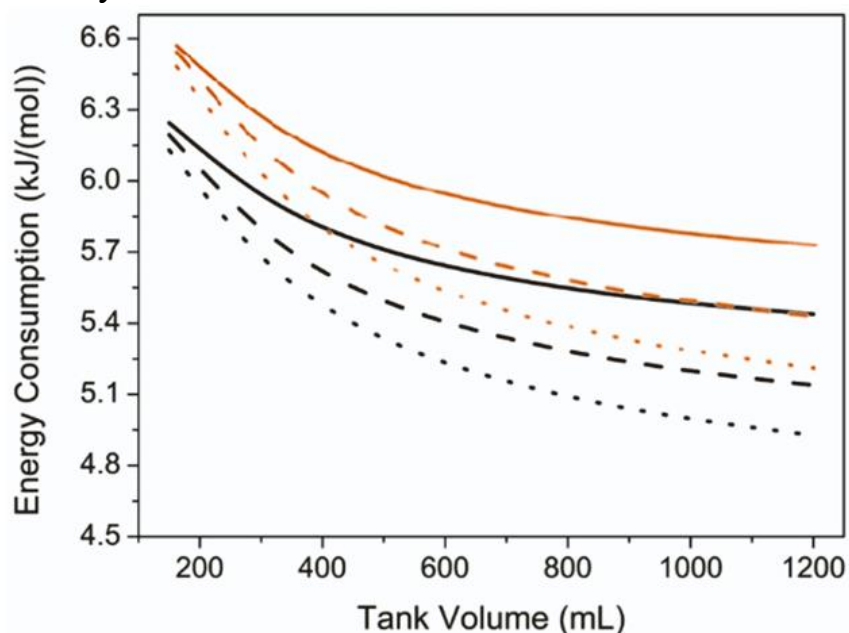


Рис. 2.1.11 Вплив різних об'ємів вирівнювального резервуара та різних швидкостей продувки на споживання енергії для часу подачі 15 хв (чорний) та 13 хв (помаранчевий) (···найвища продукція; — найнижча продукція; — без продувки)

Окремо De Witte та ін. дослідили вплив часу адсорбції та витрати продувки у PSA-процесі. У моделюванні вони варіювали ці параметри одночасно з метою оптимізації ефективності процесу. Колона була заповнена цеолітом 13X, а показники розділення CH_4 та CO_2 оцінювалися за критеріями відновлення,

чистоти й продуктивності. Математична модель була реалізована в Aspen Adsorption V.9, де модель адсорбційного шару базувалась на рівнянні стану Пенга–Робінсона, а падіння тиску враховувалось за рівнянням Ергуна. Теплоперенос у газовій, адсорбованій фазах та у стінках колони описували три енергетичні рівняння. Для розв’язання моделі застосовувався неявний метод Ейлера з перемінним кроком часу. Зафіксовано, що при неоптимальних умовах ефективність процесу значно знижувалася через прорив CO_2 та недостатню продукцію. Згідно з **рис. 2.1.12 (а)**, більші значення ступеня відновлення досягалися при довшій тривалості адсорбції для будь-якого заданого значення продуктивності. Також, як показано на **рис. 2.1.12 (b)**, за будь-якої загальної продуктивності вища витрата продувального газу покращувала чистоту продукту. Короткі інтервали адсорбції не забезпечували ефективну продукцію, тоді як довші – призводили до прориву CO_2 .

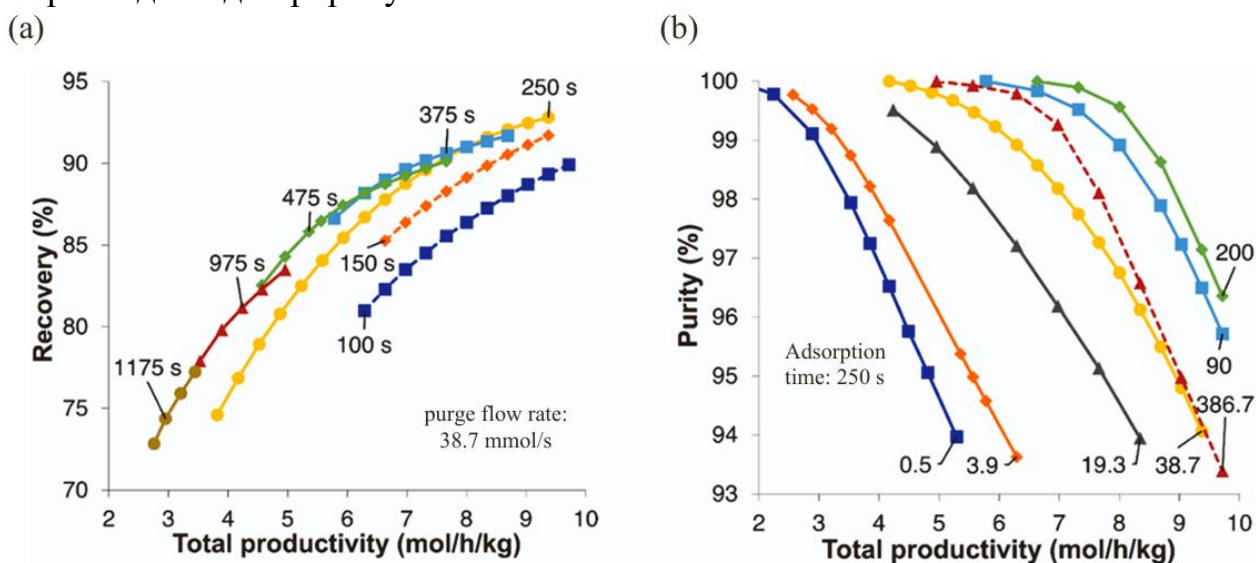


Рис. 2.1.12. Зміна (а) відновлення для різних часів адсорбції (@фіксована швидкість потоку продувки) (b) чистоти для різних швидкостей потоку продувки (@фіксований час адсорбції) для широкого діапазону загальної продуктивності

Інше дослідження, проведене Neumans та ін., було присвячене вилученню кислих газів із сирого біогазу за допомогою Basolite A100 (тип MOF MIL-53 (Al)) в PSA-процесі. Метою було досягнення чистоти CH_4 не менше ніж 96 % при початковому вмісті CH_4 на рівні 60 %. Для моделювання використано класичний цикл Скарстрьома, представлений системою одномірних диференціальних рівнянь: два рівняння масового балансу, загальний баланс мас, три рівняння масопереносу та три енергетичних баланси. Симуляція проводилась у COMSOL Multiphysics з використанням MATLAB. Ізотерми поглинання показали, що ємність сорбенту щодо H_2S вища, ніж щодо CO_2 та CH_4 . Селективність CO_2/CH_4 становила 6,5–7, а $\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$ — у межах 23–34. Як показано на **рис. 2.1.13**, між експериментальними результатами та розрахунками за IAST спостерігалася гарна відповідність. Порівняння порошкової та таблетованої форм адсорбенту виявило, що хоча показники розділення були схожими, порошок мав вищу

сорбційну ємність. Тому таблетована форма була рекомендована як оптимальна для одночасного вилучення H_2S і CO_2 , попри обмежену селективність останнього щодо CH_4 .

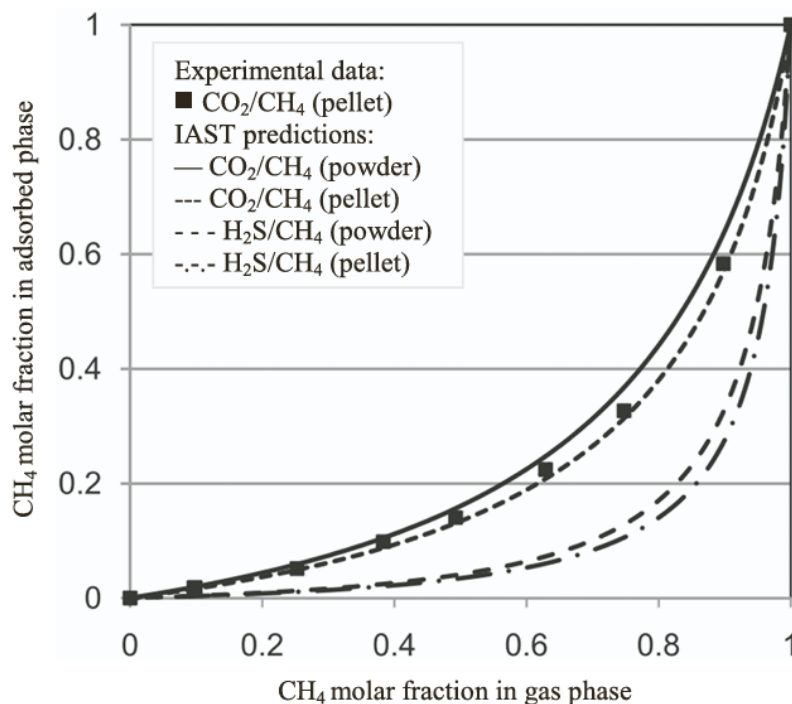


Рис. 2.1.13. Різниця між адсорбцією бінарної суміші на двох формах базоліту A100 (303,15 К та 4 бар)

Durán та ін. провели чисельне моделювання динаміки PSA-процесу очищення біогазу, зосереджуючись на концепції циркулярної економіки шляхом використання активованого вугілля, отриманого з відходів деревини (соснова тирса). Моделі створювались у Aspen Adsorption із застосуванням ізотерм Ленгмюра–Фройндліха для чистих компонентів і IAST для багатокомпонентного розділення. Кінетика масопереносу описувалась апроксимацією LDF. Валідацію проводили шляхом порівняння з експериментальними даними, а також за допомогою аналізу чутливості для оптимізації конфігурації циклу. Результати показали, що чотириетапний PSA-процес здатен забезпечити чистоту CH_4 понад 95 % і ступінь його відновлення понад 60 %, за умови тиску 3 бар та $P/F > 0.67$. Чистота метану зростала при підвищенні витрати метану та інертного газу під час стадії регенерації. Збільшення тривалості регенерації дозволяло досягати чистоти CH_4 до 99,3 %, хоча й за рахунок зниження продуктивності. Додатковим шляхом підвищення чистоти CH_4 було застосування легкого вакууму (0,4 бар) для десорбції, хоча це вимагало додаткових енергозатрат. Залежно від тиску в системі, ступінь відновлення CH_4 варіював від 43 % до 72,1 %. Також встановлено, що протиточна регенерація сприяла досягненню високої чистоти та відновлення як CH_4 , так і CO_2 без зниження продуктивності метану.

2.1.5. Вакуумно-адсорбційна сепарація з перемиканням тиску (VPSA)

Технологія VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption) поєднує в собі переваги методів PSA (адсорбційна сепарація з перемиканням тиску) та VSA (адсорбційна сепарація з використанням вакууму). Вона поєднує високу тискову адсорбцію з вакуумною десорбцією, що дозволяє досягти вищої чистоти кінцевого продукту, хоча й супроводжується дещо нижчим рівнем виходу біометану.

На відміну від традиційної PSA, VPSA забезпечує кращу регенерацію адсорбенту та вищу продуктивність. Завдяки використанню вакууму у фазі десорбції покращується чистота біометану, а обладнання потребує менших капітальних витрат і споживає менше енергії, порівняно з компресорами в системах PSA. Робота під низьким тиском також зменшує витрати на процесне обладнання.

Попри активні експериментальні дослідження VPSA в контексті очищення біогазу, математичному моделюванню та симуляції поки що приділено обмежену увагу. Однією з проблем є розмитий профіль розподілу CO₂ у колоні, що призводить до неповного використання активних центрів у шарі адсорбенту. Перспективним напрямом є зменшення тиску на стадії продування (blowdown), що може оптимізувати процес.

Першим прикладом такого підходу є дослідження Кавенаті, в якому вивчалася очистка звалищного біогазу у VPSA-системі, заповненій вуглецевим молекулярним ситом типу CMS 3K. Особливістю цього адсорбенту є повільна дифузія метану, тоді як CO₂ переноситься переважно через мікропори. У моделі враховувалися як опір на вході в пори, так і дифузія в порожнинах. Склад біогазу моделювався як 55% CH₄ та 45% CO₂. Симуляція процесу, що включала два різних чотиристадійних цикли типу Скарстрьома, показала досягнення чистоти метану на рівні не менше 96% та ступеня вилучення 75%. При підвищенні робочого тиску до 400 кПа ці показники сягали 98% і 65% відповідно. В моделі також порівнювалися адіабатичні та ізотермічні умови: у першому випадку температура в колоні зростала, що сприяло десорбції CO₂ і, як наслідок, підвищенню чистоти та виходу метану на ≈0,8%.

З метою подальшого підвищення якості очищення метану була запропонована нова конфігурація циклу з контрструмінною пресуризацією, яка, однак, не показала істотних переваг через слабке поглинання метану в пори.

У наступному дослідженні Гранде було проведено порівняння ефективності рівноважних та кінетичних адсорбентів для VPSA. Кінетичну сепарацію забезпечував CMS 3K, а рівноважну – цеоліт 13X. Метою було досягнення чистоти CH₄ понад 98% за рахунок ефективного видалення CO₂.

Математичні моделі використовувалися аналогічні до попереднього дослідження, а симуляція проводилася на основі експериментальних даних. Процес складався з п'яти стадій (рис. 2.1.14). Для опису кінетики адсорбції застосовували двокомпонентну модель лінійного драйву (bi-LDF), яка враховує макро- та мікропорову дифузію в гранулах і кристалах відповідно. Константи мікропорової дифузії враховували бар'єри на вході в пори, тоді як макропорову дифузію обчислювали з урахуванням молекулярних та Кнудсенівських умов. Біогаз містив 45% CO₂, подавався зі швидкістю 1000 Nm³/год. Температура й тиск процесу становили 298 K та 1 атм відповідно. Загальну ефективність оцінювали за трьома параметрами: чистота продукту, ступінь вилучення метану та продуктивність процесу.

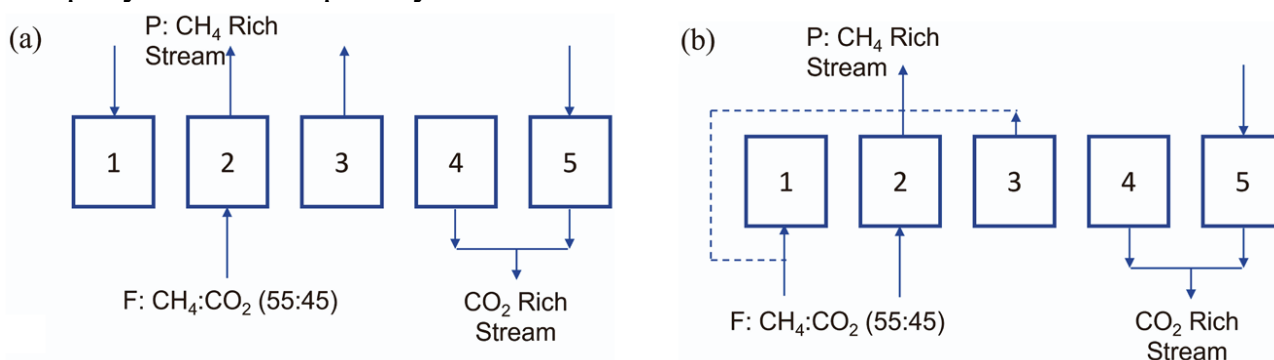


Рис. 2.1.14 Схема циклів VPSA, що використовуються для очищення біогазу з використанням (a) CMS 3 К (b) цеоліту 13X

Було встановлено, що обидва досліджувані адсорбенти — це цеоліт 13X та CMS 3К — забезпечують цільову чистоту метану на рівні 98%. Водночас, CMS 3К демонстрував майже на 20% вищий рівень рекуперації метану порівняно з цеолітом. Продуктивність CMS 3К також була значно вищою, а енергоспоживання — приблизно на 34% нижче (0,27 проти 0,41 кВт·моль⁻¹ CH₄).

Цікавим відкриттям стало те, що додавання проміжного етапу депресуризації значно покращує рекуперацію метану без істотної втрати його чистоти. При подальшому дослідженні умов роботи з CMS 3К було встановлено, що у стандартному циклі Скартстрьома максимальний рівень рекуперації метану обмежувався 60%, попри високу чистоту. Підвищення тиску покращувало розділення компонентів і дозволяло досягти чистоти до 98% і рекуперації понад 80%. Для порівняння, при використанні цеоліту 13X рекуперація не перевищувала 50% при чистоті понад 98%.

Шуїкі та співавт. виконали математичне моделювання кінетичного розділення CO₂ і CH₄ за допомогою CMS 3К, з метою дослідити вплив різних конфігурацій циклу VPSA (вакуумно-температурна адсорбція) на ефективність процесу та розробити новий цикл з підвищеною рекуперацією метану. Було використано розширене рівняння Ленгмюра з трьома активними центрами, параметри якого отримано з експериментальних даних. З огляду на бідисперсну структуру CMS, у моделі враховано транспорт через мікро- та макропори, дифузію при вході в пори, а також подвійну опірність, при цьому використано рівняння Даркена для зв'язку концентрації й дифузії.

Цикл VPSA, змодельований у FORTRAN, складався з п'яти колон з етапами рециркуляції й вирівнювання тиску. Було досягнуто чистоти метану понад 97%. Застосування потоку рециркуляції дозволяло зменшити втрати метану у продувці. Як показано на **рис. 2.1.15**, збільшення коефіцієнта рециркуляції на 10% призводило до зростання рекуперації приблизно на 2%, хоча при цьому знижувалась одинична продуктивність системи. Оптимальним визнано 60% рециркуляції, що забезпечувало рекуперацію 91,5% при питомому енергоспоживанні 0,35 кВт·год/м³ CH₄.

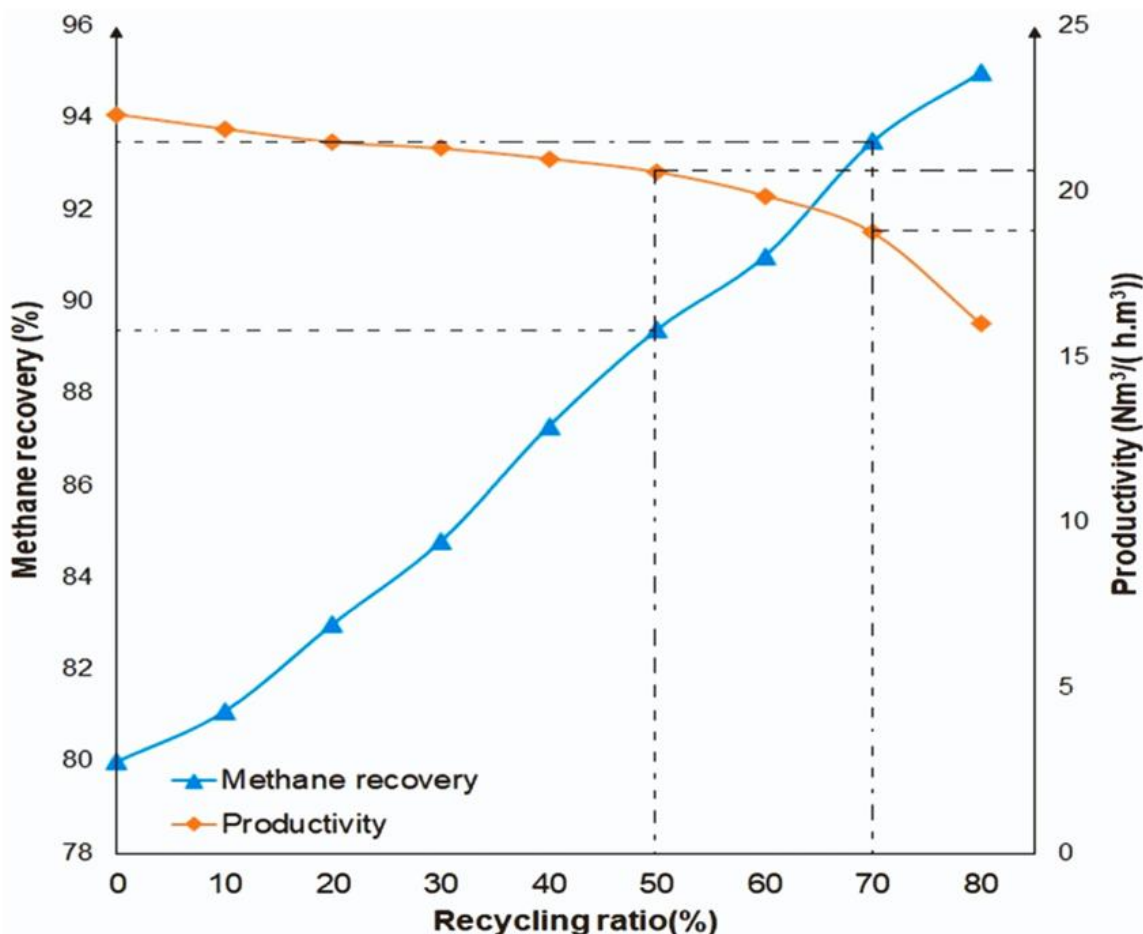


Рис. 2.1.15 Тенденції змін у рекуперації та продуктивності CH₄ для різних коефіцієнтів переробки

Подальше динамічне моделювання проводилося для аналізу енергоспоживання процесу VPSA з різними сценаріями очистки біогазу. Було враховано адсорбенти різних типів: MOF-508b, цеоліт 13X (рівноважні) і CMS 3K (кінетичний). У моделі (див. **рис. 2.1.16**) розглядалися дві колони та шість етапів циклу з двома етапами вирівнювання тиску. Проведено чутливий аналіз для виявлення впливу тиску адсорбції та десорбції, а також співвідношення подачі до продуктивності (P/F) на чистоту продукту й енергоспоживання. Було встановлено, що тиск адсорбції, необхідний для досягнення 98% чистоти метану та 85% рекуперації, залежить від типу адсорбенту: від 6 до 8 бар. Підвищення тиску збільшувало чистоту, але зменшувало рекуперацію. Найкращим тиском десорбції було 0,3 бар для цеоліту 13X і MOF-508b, і 0,15 бар для CMS 3K.

Також виявлено, що оптимальні значення співвідношення P/F для досягнення цільових показників становлять 0,3 (цеоліт 13X), 0,15 (CMS 3K) та 0,1 (MOF-508b). Збільшення довжини колони зменшувало коливання чистоти метану на виході. Мінімальне питоме енергоспоживання спостерігалось для колон PSA, заповнених MOF-508b, за яким ішов CMS 3K, і далі — цеоліт 13X. При фіксованій довжині колони 135 см, найменший діаметр, необхідний для досягнення цільових характеристик, був у CMS 3K, далі MOF-508b і найбільший — у цеоліту 13X.

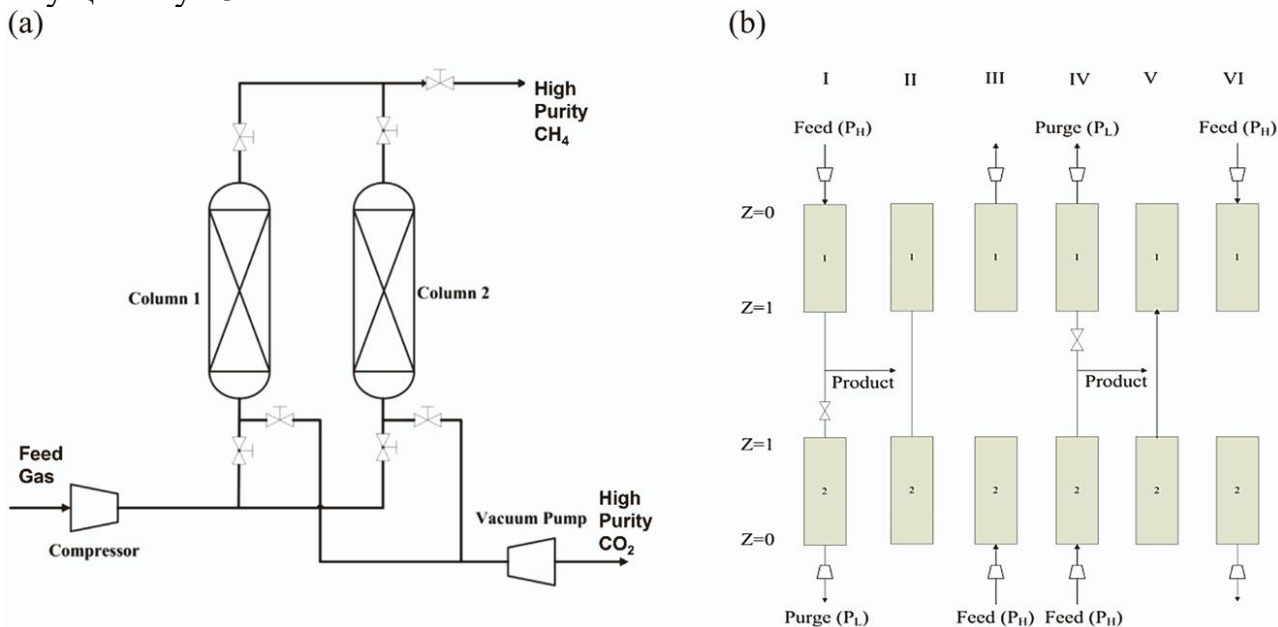


Рис. 2.1.16 (a) Конфігурація процесу запропонованого процесу VPSA для покращення біогазу (b) Послідовність модифікованого циклу Skarstrom VPSA, що включає два етапи вирівнювання тиску

2.1.6. Адсорбція з температурним перемиканням (TSA)

Серед адсорбційних процесів технологія TSA (Temperature Swing Adsorption) продемонструвала перспективні результати щодо видалення CO₂ з різних газових потоків. На відміну від поширеного використання фіксованих адсорбційних колон для PSA, TSA має перевагу у можливості експлуатації як з фіксованим, так і з псевдозрідженим шаром, що дозволяє здійснювати процес у безперервному режимі. TSA також легше контролювати завдяки використанню помірних температур і тисків на етапах адсорбції та десорбції.

У порівнянні зі скрубванням, TSA забезпечує вищу здатність до поглинання CO₂ при нижчій теплоємності сорбенту. Крім того, проблема корозії при використанні твердих амінових адсорбентів у TSA значно менша, ніж у випадку з рідкими амінами в скруберах. Важливою перевагою TSA також є те, що висота обладнання може бути меншою, особливо при використанні каскадної конфігурації.

Окрім експериментальних досліджень, було виконано декілька комп'ютерних моделювань, які дозволили отримати уявлення про динаміку процесу TSA і проектування обладнання. Зокрема, запропоновано математичну

модель на основі програмного середовища IPSEpro™ для моделювання процесу очищення біогазу TSA-технологією. Була розроблена система з псевдозрідженим шаром, заповнена сорбентом Lewatit® VP-OC-1065 — аміновмісним матеріалом з високим спорідненням до CO₂ та майже нульовою здатністю до зв'язування CH₄.

Оскільки поглинання водяної пари є важливим фактором, у моделі враховано вплив вологи. Значною перевагою псевдозрідженого шару є високий коефіцієнт теплопередачі, який може бути ще вищим при протитечійному режимі. У проєкт також було включено тепловий насос високотемпературного рівня, який забезпечував регенерацію сорбенту шляхом повторного використання тепла, отриманого під час адсорбції.

На рис. 2.1.17 показано ядро програмного модуля TSA, яке складається з окремих каскадних моделей псевдозріджених шарів. Тепловий насос забирав необхідну енергію з теплоносія адсорбера. Оскільки потреба в охолодженні перевищувала кількість відновленого тепла, було додано додаткове джерело охолодження для закриття теплового контуру.

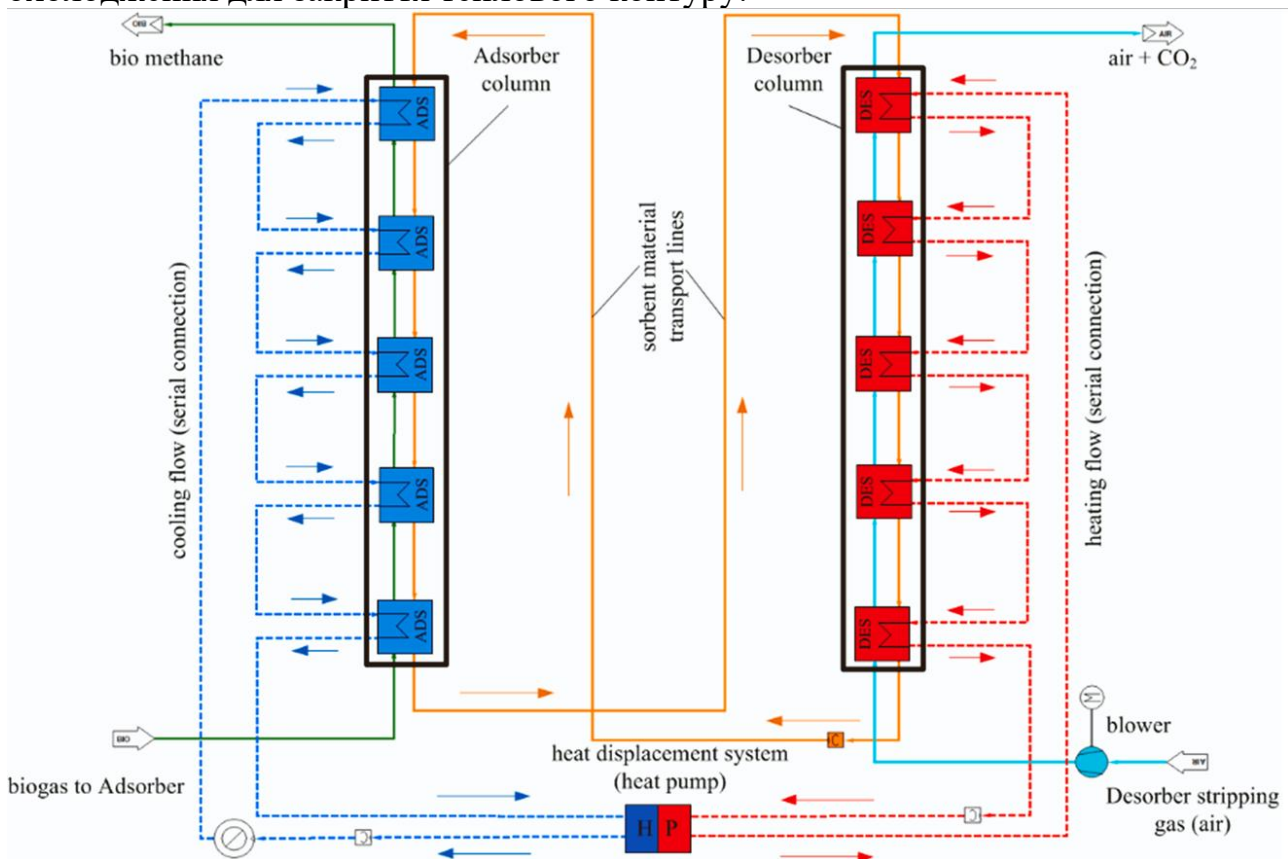


Рис. 2.1.17 Схема технологічного процесу подвійної 5-ступінчастої конфігурації TSA, що складається з окремих моделей блоків стадій псевдозрідженого шару

Кожна стадія процесу базувалася на масових та енергетичних балансах для всіх компонентів у газовій та твердій фазі. П'ять моделей таких каскадних контактних стадій були об'єднані для створення повноцінної колонки газ–тверде тіло, у якій потоки рухались протитечією, а теплообмін у межах кожної стадії забезпечував стабільну температуру. Ефективність роботи системи оцінювали за

трьома критеріями: ефективністю уловлювання, теплопередачею та тепловою утилізацією. Усі аспекти були об'єднані в цілісну модель системи TSA, яка дозволяє не лише аналізувати, але й оптимізувати різні модифікації обладнання.

Згодом дослідники розширили своє моделювання, зосередившись на зниженні енерговитрат і підвищенні чистоти метану. У цій модифікації система складалася з двох з'єднаних між собою колон із псевдозрідженим шаром, розділених на п'ять стадій, заповнених твердими аміновими сорбентами для селективного вилучення CO₂. Схема системи показана на **рис. 2.1.18**. У цьому варіанті тепло, яке виділялося при адсорбції, використовували для регенерації сорбенту.

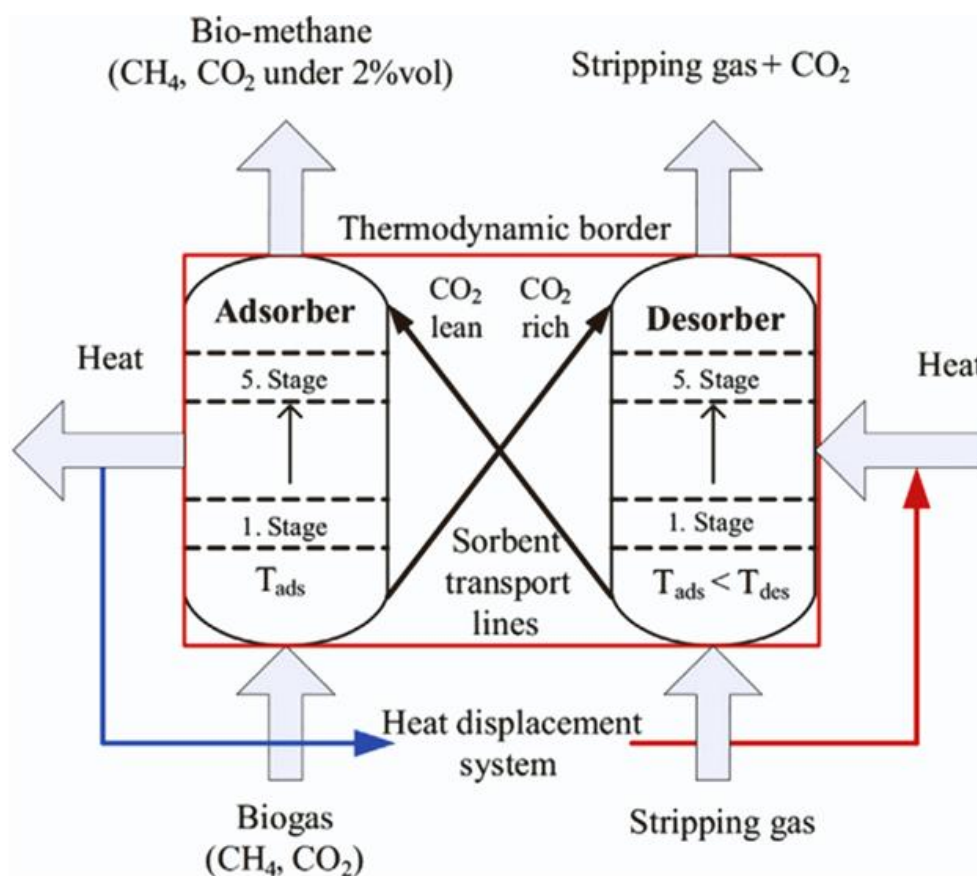


Рис. 2.1.18 Схема запропонованої установки TSA, що включає абсорбційну та десорбційну колони для очищення біогазу

Симуляції також проводилися в середовищі IPSEpro™ з використанням рівнянь масового та енергетичного балансу на основі моделі Ленгмюра. Оцінювали вплив температури регенерації, витрати газу-десорбенту та інтеграції теплового насоса. Аналіз показав, що при зниженні температури десорбції збільшувалась інтенсивність циркуляції сорбенту через підвищене навантаження на нього. При температурі близько 100 °C циркуляція сорбенту стабілізувалась на рівні ~10 кг/кг CH₄ незалежно від витрати десорбуючого газу.

Мінімальні енерговитрати на регенерацію сорбенту коливалися в межах 2,6–2,8 МДж/кг CH₄, а при використанні високотемпературного теплового насоса — ще менше, до 1,7 МДж/кг при температурі 100 °C.

2.1.7. Видалення домішок у фіксованих адсорбційних шарах

Видалення залишкових і слідових домішок є не менш важливим, ніж усунення основних забруднень із сирого біогазу. Це особливо актуально для сірководню (H_2S), який через свою високу корозійну активність може завдавати шкоди обладнанню, зокрема двигунам внутрішнього згоряння. Поряд із поширеним застосуванням традиційних методів абсорбції, зростає інтерес до використання фіксованих адсорбційних колон у режимі одноразового проходження. Такі установки вважаються перспективними для очищення попередньо обробленого біогазу, оскільки можуть працювати в безперервному режимі до повного насичення сорбенту. Після цього колонку або замінюють, або регенерують, залежно від умов експлуатації.

На відміну від методів PSA, такі системи мають значно простішу конструкцію та споживають менше енергії, адже зазвичай використовують лише одну колонку.

У сучасних дослідженнях моделювання процесу видалення H_2S із біогазу виконувалось для сорбентів, одержаних із обробленого осаду стічних вод. Було розроблено динамічну модель, яка дозволила визначити оптимальні параметри адсорбера, зокрема висоту колони, ємність сорбенту та тривалість роботи установки.

Для аналізу динаміки процесу застосовувались два підходи: модель Бохарта-Адамса, що ґрунтується на прямокутній ізотермі і характерна для процесів із хімічними реакціями, та модель лінійної кінетики плівки (LDF), вирішена як аналітично, так і чисельно (в середовищі Aspen Adsorption із використанням рівняння Клінкенберга). Було виявлено, що модель Бохарта-Адамса забезпечує точне передбачення моменту прориву лише за певних умов, а результати моделювання Клінкенберга є менш точними через використання лінійної замість нелінійної ізотерми.

Застосування моделі Фройндліха у середовищі Aspen Adsorption дозволило точно відтворити експериментальні криві прориву для чотирьох початкових концентрацій H_2S — 162, 570, 1065 і 1980 ppm (див. **рис. 2.1.19**). Це забезпечило основу для масштабування процесу від лабораторного до пілотного рівня з кратністю витрати газу до 150 разів. Було також встановлено, що крутизна кривої прориву зростає зі збільшенням концентрації H_2S у подачі, проте її форма майже не змінюється зі зростанням висоти шару, оскільки маса сорбенту зростає пропорційно до часу перебування газу.

Було показано, що розроблений підхід чутливий до коливань концентрації H_2S у вхідному потоці, тому його застосування для прогнозування кривих прориву доцільне лише після перевірки виконання усіх припущень моделі та відповідного коригування параметрів.

Інше дослідження також було присвячене моделюванню процесу видалення слідових забруднень із біогазу за допомогою активованого вугілля. Модель включала баланс маси в газовій фазі колони, баланс усередині частинки, рівняння ізотерми адсорбції та метод IAST для врахування конкуренції між

домішками. Враховано два механізми переносу: зовнішній — від газової фази до плівки навколо частинки, та внутрішній — через пори сорбенту. Рівноважна поведінка сорбенту описувалася ізотермою Ленгмюра. Прогнозування моменту прориву було здійснено на основі експериментальних даних, і навіть для конкурентної адсорбції було досягнуто низьких значень середньоквадратичної похибки в початковій частині кривої прориву, що свідчить про точність і надійність запропонованої моделі.

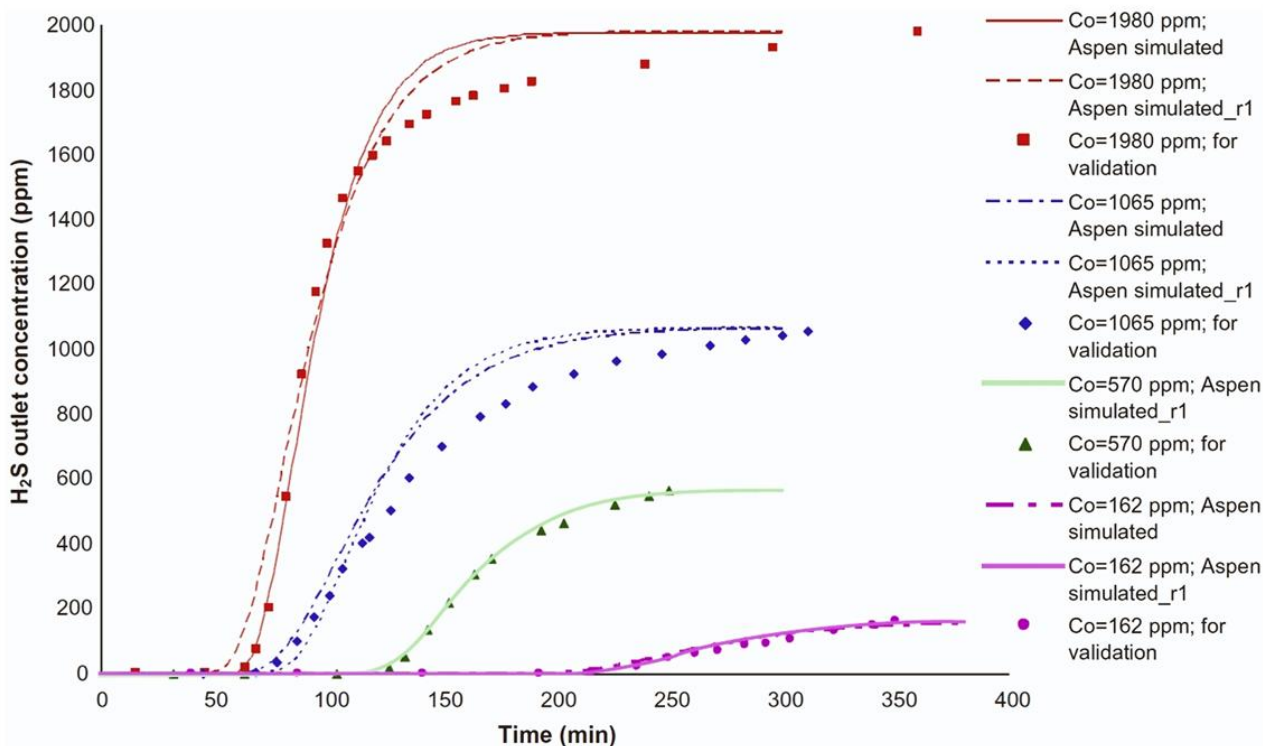


Рис. 2.1.19 Експериментальні та змодельовані за допомогою Aspen Adsorption криві прориву для адсорбенту LG700PA при чотирьох концентраціях H₂S у подачі

2.1.8. Гібридизація процесів, їх інтенсифікація та техніко-економічна оцінка

Одним із дієвих підходів до інтенсифікації процесів газового розділення є стратегія гібридизації. Гібридний процес передбачає поєднання щонайменше двох різних технологій — зазвичай послідовно, але іноді й паралельно. Такий підхід дозволяє одночасно використовувати переваги кожної з технологій, підвищуючи загальну ефективність і продуктивність процесу.

У центрі уваги можуть бути різні показники — вихід продукту, його чистота, енергоспоживання або економічні чинники. Важливу роль у виборі комбінації процесів відіграють саме економічні аспекти, які впливають на прийняття рішень щодо доцільності гібридизації, порядку включення етапів та інших важливих параметрів.

Зазначимо, що лише експериментальні методи не можуть забезпечити повний обсяг інформації для планування можливих сценаріїв. Це пояснюється

складністю експериментальних установок, обмеженнями за розміром, продуктивністю та складністю вимірювань, особливо щодо динаміки процесів. Тому моделювання і симуляція стають надзвичайно цінними інструментами, які дозволяють досліджувати техніко-економічні аспекти та виконувати аналіз чутливості до різних параметрів на ранніх етапах проєктування.

У галузі очищення біогазу гібридні процеси також знаходять застосування. Було розроблено модель гібридного процесу, що поєднує термічну адсорбцію (TSA) та двоступеневу мембранну установку. У такій конфігурації досягнуто високої чистоти метану (понад 97%) при втраті метану лише 0,67%. Потік CO₂ при цьому мав чистоту 99% і ступінь вилучення 95,5%. Для покращення ефективності використовувалась стратегія рециркуляції потоку, що не є продуктом мембранного етапу. Схема запропонованої конфігурації наведена на **рис. 2.1.20**.

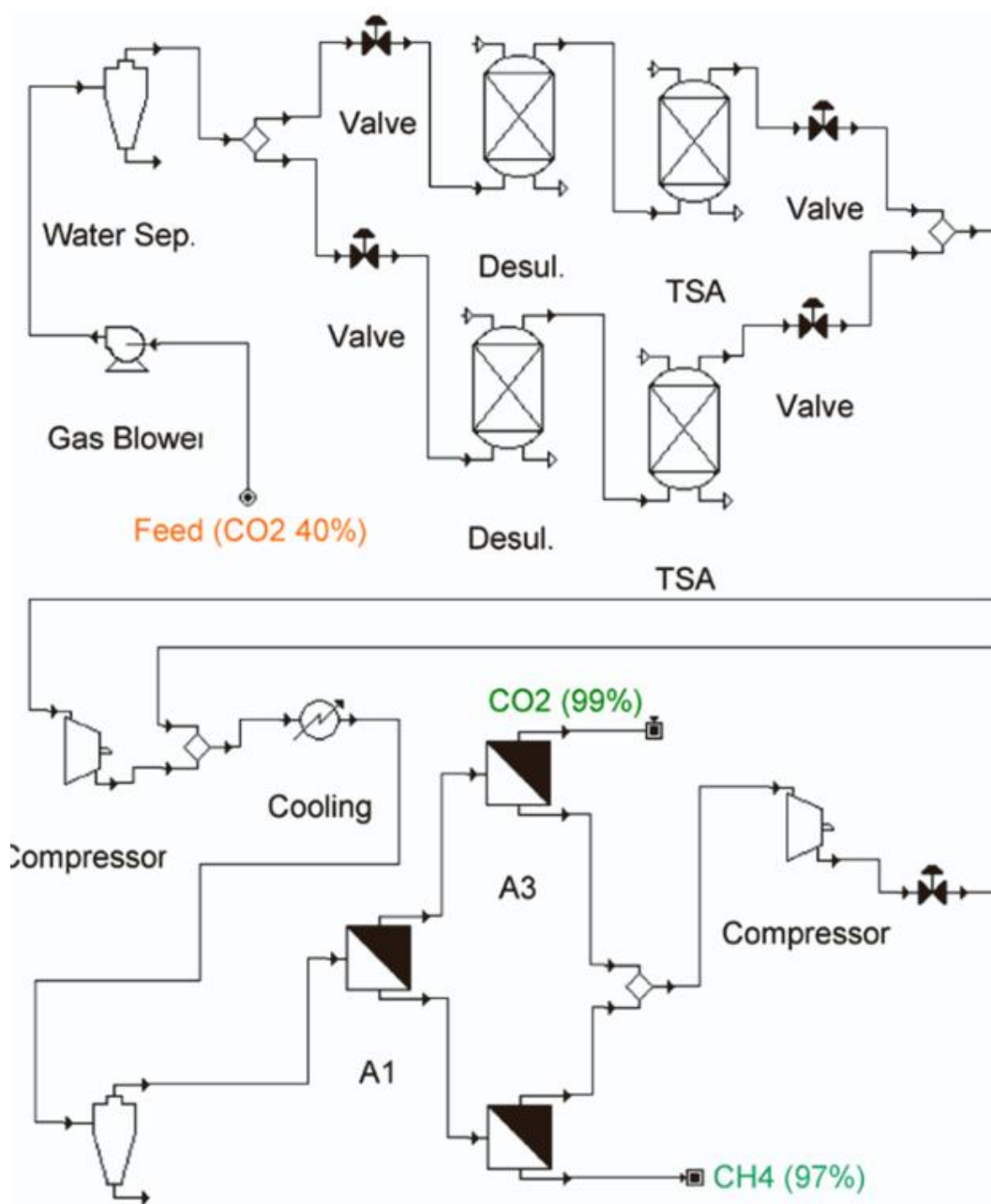


Рис. 2.1.20 Конфігурація та схема гібридного процесу, що включає TSA та мембранні лінії, досліджені для очищення біогазу

Симуляцію виконували за допомогою розробленого Excel-модуля на основі рівнянь переносу, з урахуванням змін у складі потоку по довжині мембранного модуля. Мембранний етап оптимізували з метою зниження загальних витрат — завдяки двоступеневій схемі вдалося уникнути повторної компресії. Загалом показано, що така мембранна установка є економічно вигіднішою за PSA (адсорбцію при змінному тиску), з орієнтовним строком окупності 6,8 місяця для установки з продуктивністю 200 м³/год. Споживання енергії склало 0,031 Дж/Дж метану, або 1,69 МДж/кг СН₄.

Інші дослідження були спрямовані на інтенсифікацію процесів PSA шляхом зменшення розмірів установок. Наприклад, було змодельовано трьох- та чотириколонні схеми з використанням цеоліту 5A як адсорбенту. Найкращі результати для чистоти понад 99,9% продемонстрували трьохколонна схема та модифікований дуплекс PSA. При цьому енергоспоживання та розміри установок зменшувались у 2 та 4 рази відповідно. Було показано, що збільшення вмісту метану у вхідному потоці або зниження вимог до чистоти продукту дає змогу зменшити споживання енергії.

У ще одному дослідженні було розроблено комплексну модель, що дозволяє обґрунтовано обирати технології очищення біогазу для різних сценаріїв. Модель включала абсорбцію амінами, PSA та мембранні технології. Оптимізацію виконували окремо для кожної технології, а потім інтегрували в єдину надмодель. У результаті визначено найкращі матеріали: діетаноламін для абсорбції, поліімід для мембран та цеоліт 13X для PSA. Економічна оцінка показала перевагу PSA над іншими, а як сировину з найменшими витратами обрано харчові відходи, що дало собівартість 0,36 €/м³ біометану та капітальні витрати на рівні 67 млн євро для заводу з річною переробкою 311 000 тонн.

Схожі моделі можуть бути використані для порівняння лише адсорбційних процесів, змінюючи типи сорбентів у симуляції.

2.1.9. Висновки та рекомендації

Поява потужніших інструментів і методів відкрила нові можливості для моделювання та імітації процесів адсорбції. З іншого боку, зростаючий попит на очищення біогазу обумовлює необхідність розробки більш ефективних технологій. На основі проведеного огляду опублікованих досліджень можна сформулювати такі висновки та рекомендації:

Використання молекулярних обчислювальних інструментів для моделювання та аналізу властивостей адсорбентів і процесів є новітнім трендом, що активно розвивається. Особливо перспективним є поєднання таких інструментів з іншими методами, як ММ (метод молекулярної механіки), МД (молекулярна динаміка), МС (монте-карло), GCMC (грандканонічне монте-карло), для глибшого розуміння механізмів процесів. Вже отримано корисні результати щодо властивостей гідрофільних і гідрофобних цеолітів, впливу

структури та полярності на ефективність адсорбції. Наступним кроком є застосування цих підходів до інших кінетичних і рівноважних адсорбентів з метою виявлення найкращих кандидатів для очищення біогазу.

Збагачення бази даних результатів таких досліджень дозволить ефективніше застосовувати методи машинного навчання для аналізу, скринінгу, оптимізації та прогнозування ефективності нових адсорбентів. Це актуально не лише для біогазу, а й для інших технологічних напрямків. Уже існує алгоритм, спеціалізований для вилучення CO₂ за допомогою цеолітів, який може стати платформою для подальшого розвитку.

Серед адсорбційних технологій математичне моделювання та симуляція найбільш поширені для процесів PSA. Це сприяло вдосконаленню проектування, оптимізації схем, підвищенню ефективності та зниженню витрат. Особливо цінною є можливість проведення чутливого аналізу параметрів без необхідності дорогих експериментів. Основна увага поки що зосереджена на цеолітах, CMS і MOF, але існує потреба в дослідженні інших перспективних матеріалів.

Щодо VPSA, дослідження здебільшого спрямовані на розробку нових конфігурацій циклів або їх модифікацію. Зокрема, вивчається вплив параметрів роботи, ізо- та адіабатичних умов. Узгоджено, що за правильного налаштування умов можна досягти високої ефективності, чистоти та ступеня відновлення продукту. Водночас залишаються нерозв'язаними проблеми низької дифузійної здатності CO₂ в адсорбенті, що призводить до розмитого профілю концентрацій, а також потреба в дуже низькому тиску при продувці й відповідні енергетичні витрати.

Для TSA технологій моделювання також відкриває перспективи, зокрема завдяки можливості використання псевдозріджених шарів для безперервної роботи. Враховуючи енергоефективність і високу продуктивність TSA, у майбутньому можна очікувати ще кращі результати.

Хоча процеси видалення домішок за допомогою адсорбції мають відносно просту реалізацію, подальший розвиток математичних моделей і їх оптимізація залишаються важливим напрямком досліджень.

2.2. РОЗДІЛЕННЯ ТВЕРДОЇ ТА РІДКОЇ ФАЗИ ДИГЕСТАТУ З БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ

2.2.1. Вступ

За оцінками, щороку в ЄС утворюється понад 180 мільйонів тонн дигестату, основна частина якого використовується як добриво на сільськогосподарських полях. Згідно з цільовим показником ініціативи REPowerEU, до 2030 року планується досягти виробництва 35 мільярдів кубометрів біометану шляхом анаеробного зброджування. Це потребуватиме

швидкого розширення біогазового сектору і, відповідно, призведе до зростання об'ємів дигестату, що потребуватиме обробки та утилізації.

Це створить низку викликів, зокрема, необхідність зменшення викидів з емностей для зберігання дигестату та скорочення витрат на транспортування, але водночас відкриє можливості для більш ефективного вилучення та повторного використання поживних речовин. Анаеробне зброджування не лише генерує біометан, а й продукує дигестат, багатий на поживні речовини. Цей процес збільшує частку легкодоступних для рослин сполук, підвищуючи цінність дигестату як добрива. Крім того, дигестат містить органічні речовини, що повільно розкладаються, здатні покращувати структуру ґрунту і сприяти накопиченню вуглецю в ньому.

З енергетичної точки зору та з позиції зменшення викидів дигестат демонструє кращі показники порівняно з традиційними мінеральними добривами. Саме тому його широко використовують як біодобриво в сільському господарстві, а його агрономічна цінність значною мірою залежить від складу сировини, що подається на зброджування.

Високий вміст води в дигестаті призводить до великих обсягів транспортування та значних витрат, особливо коли біогазові установки розташовані в районах із надмірним накопиченням поживних речовин через централізоване тваринництво або високу щільність населення. Європейські нормативні акти, зокрема Нітратна директива, встановлюють обмеження на кількість поживних речовин, які дозволено вносити в ґрунт, регламентують терміни внесення та потребу у мінімальних об'ємах зберігання.

Однією зі стратегій оптимізації управління дигестатом є його попередня обробка, яка може переслідувати різні цілі – від зменшення експлуатаційних витрат до отримання цінніших кінцевих продуктів. Це можуть бути фракції з високим або низьким вмістом фосфору, рідини з високою концентрацією амонійного азоту або розчини солей амонію.

Найпоширенішим етапом обробки є розділення дигестату на тверду та рідку фракції. Цей процес дозволяє відокремити важкорозкладні органічні речовини, волокна, органічний азот і фосфор у тверду частину, тоді як рідка фракція зберігає більшість води, амонійного азоту та калію. Тверду фракцію зазвичай складують і використовують як ґрунтоформуєчий матеріал, а рідку – як добриво з високим вмістом азоту.

Обидві фракції можуть піддаватися додатковій обробці із застосуванням технологій вилучення поживних речовин, таких як хімічна екстракція фосфору, мембранна фільтрація, аміачна деструкція або випаровування. Для забезпечення ефективності цих процесів, рідка фракція повинна містити якомога менше твердих частинок і волокон, що підкреслює важливість якісного розділення дигестату на початковому етапі.

Сучасні технології твердорідинного розділення дигестату походять з технологій обробки стічних вод і гною. Найбільш відомими є шнековий прес, центрифуга та вібраційне сито. Їхня ефективність залежить від багатьох

чинників: складу вихідної сировини, характеристик дигестату, а також застосування хімічних реагентів перед розділенням.

Попри те, що існує чимало повномасштабних реалізацій і технічних рішень, результати досліджень їхньої ефективності важко порівнювати через відмінності в підходах, методах оцінювання та показниках. У різних роботах акцент робився на різних аспектах – від маси і сухої речовини до вмісту азоту, фосфору, мікроелементів та важких металів.

Однак часто бракує детальної інформації про склад сировини, характеристики фракцій або енергоспоживання обладнання. Ці параметри мають важливе значення для оцінки ефективності розділення та подальшої обробки продуктів. Тому виникає гіпотеза, що саме тип сировини та обрана технологія розділення значно впливають на продуктивність процесу і витрати енергії.

Практикам і дослідникам у сфері біогазу потрібна комплексна оцінка ефективності твердорідного розділення, яка враховує характеристики дигестату та рівень енергоспоживання. Це дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо впровадження або вдосконалення таких технологій на діючих установках, а також забезпечить точні дані для подальшого системного аналізу.

З цією метою було проведено систематичний огляд 49 наукових публікацій і джерел «сірої» літератури, присвячених повномасштабному твердорідному розділенню дигестату з біогазових установок, які працюють на сировині, відмінній від стічних вод. У цьому огляді розглядається ефективність розділення, якість отриманих фракцій та рівень споживання енергії. Огляд покликаний відповісти на такі дослідницькі запитання:

- Якими є показники відокремлення сухої речовини, відновлення поживних елементів і якість фракцій при застосуванні повномасштабних технологій розділення?
- Наскільки використання хімічних реагентів впливає на ефективність розділення?
- Яке енергоспоживання необхідне для розділення сухої речовини та вилучення поживних речовин?

2.2.2. Матеріали та методи

2.2.2.1. Систематичний пошук та відбір публікацій

Пошук літератури здійснювався відповідно до загальноприйнятих принципів проведення систематичного аналізу джерел. Пошуковий запит включав чотири складові, поєднані логічними операторами: (сфера застосування) І ((процеси й технології) АБО (продукти розділення) АБО (моделювання)). Щоб уникнути упередженості результатів, були включені також джерела із так званої «сірої літератури».

Пошук рецензованих статей здійснювався у наукових базах, тоді як сірі джерела збиралися через інтернет-пошуковики. Робота проводилась англійською, німецькою та італійською мовами, а також доповнювалась переглядом списків літератури за методом «сніжної кулі».

На етапі відбору джерел було усунуто дублікати, проведено аналіз заголовків, анотацій і основного тексту. Прийнятими вважалися лише дані з повномасштабних сепараторів, що застосовувалися для переробки дигестату із вологих біогазових установок (із вмістом сухої речовини менш ніж 120 г/л). Також розглядалися лише ті спостереження, в яких повідомлялись вимірювання вмісту ключових елементів як у вихідному дигестаті, так і в рідкій і твердій фракціях — у вигляді концентрацій або масового балансу. Оглядові матеріали, аналітичні звіти та дані щодо осаду стічних вод або недигестованих субстратів виключались. У випадках, коли не було можливості визначити відповідність джерела критеріям, проводився контакт з авторами для уточнення інформації.

2.2.2.2. Збір і класифікація даних

Відібрані джерела були впорядковані в єдину базу даних із зазначенням умов анаеробного зброджування, складу субстратів, дозування хімічних реагентів тощо. Кожне спостереження було віднесене до певного класу дигестату залежно від переважного типу субстрату (понад 50% масової частки): гній (MA), енергетичні культури (CR), харчові відходи (FW) або невизначені (U). До класу MA включались відходи тваринництва, до CR — силос, солома тощо, до FW — відходи харчової промисловості, гліцерин, органічні фракції ТПВ.

Сепараційні технології, що застосовувались до необробленого дигестату (без додавання реагентів), були поділені на групи: шнекові преси (SP), центрифуги (C), шнековий прес з другим етапом розділення (SP+sep), а також інші варіанти (Other). Для обробленого дигестату розглядалися лише ті випадки, де використовувалися центрифуги (C*) або комбінація шнекового преса з центрифугою (SP+C*).

Дані щодо вмісту елементів поділялися на органічну та неорганічну форми, причому концентрації переводились у відповідні елементи (наприклад, K_2O у K) у перерахунку на г/л. У разі неповної інформації, авторів джерел також контактували для уточнення.

2.2.2.3. Оцінювання ефективності

Було враховано різні критерії оцінювання, оскільки цілі твердорідинного розділення можуть відрізнятися. Спочатку проводилось порівняння різних типів сепараторів для різних класів дигестату. Далі аналізувалась ефективність із використанням хімічних реагентів.

Один із ключових індикаторів — індекс розділення (SI) для сухої речовини, органічного азоту та загального фосфору. Він визначається як відношення маси елемента, що перейшов у тверду фракцію, до його маси у вихідному дигестаті. Формула для обчислення SI (1):

$$SI_X = RSF \cdot \frac{[X]_{SF}}{[X]_{DIG}}$$

Де RSF — співвідношення маси твердої фракції до загальної маси дигестату, $[X]_{SF}$ та $[X]_{DIG}$ — концентрації елемента у твердій фракції та в сирому дигестаті відповідно.

RSF розраховувалось за формулою (2):

$$RSF = \frac{[DM]_{DIG} - [DM]_{LF}}{[DM]_{SF} - [DM]_{LF}}$$

Де: $[DM]_{DIG}$, $[DM]_{LF}$, $[DM]_{SF}$ — концентрації сухої речовини в сирому дигестаті, рідкій та твердій фракціях відповідно.

Окрім того, аналізувалися абсолютні концентрації елементів у розділених фракціях: суха речовина, органічний азот і загальний фосфор — у твердій; суха речовина, амонійний азот і калій — у рідкій. Також обчислювалося співвідношення концентрації елемента у фракції до його концентрації у вихідному дигестаті для оцінки збагачення.

Оцінювалась також енергоефективність: споживання електроенергії для переробки одиниці маси дигестату, сухої речовини або окремих елементів — окремо для шнекового преса та центрифуги.

2.2.2.4. Статистичний аналіз

Параметри, що аналізувались (RSF, SI, концентрації елементів і співвідношення концентрацій), розглядалися як залежні змінні, а тип сепаратора та клас дигестату — як фактори. Спостереження з використанням хімічних реагентів розглядалися окремо.

Для порівняння середніх значень застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA), а також пост-хок тест Тьюкі при значущості 0,05. Тобто, описані відмінності вважалися статистично значущими, якщо $p < 0,05$.

2.2.3. Результати

2.2.3.1. Вхідні дані

У межах цього систематичного огляду було проаналізовано 49 джерел, що дало 175 спостережень, які охоплюють 9 типів сепараторів у 18 різних комбінаціях. Кількісний склад субстрату було визначено для 123 спостережень, ще 52 віднесено до категорії «невизначено». Клас «гній» представлений 77 спостереженнями — більше ніж удвічі більше, ніж у класі «рослинні залишки» (30 спостережень). Близько 80% даних стосувалися необробленого дигестату, що здебільшого перероблявся гвинтовими пресами або центрифугами (85 і 23 випадки відповідно). У тих випадках, коли дигестат обробляли хімічними реагентами, для подальшої сепарації застосовували центрифуги — окремо або в комбінації з гвинтовим пресом — у 30 з 38 спостережень.

2.2.3.2. Сепарація за масою і сухою речовиною

Для різних класів дигестату центрифуги в середньому передавали 12% свіжої маси в тверду фракцію (коефіцієнт RSF), гвинтові преси — 11%, тоді як значення RSF для каскадного застосування гвинтових пресів варіювали від 11% до 40%. Найменша варіація RSF була зафіксована для гною, а найбільша — для відходів харчових продуктів, де максимальне значення становило 40%. Додавання реагентів збільшувало середній коефіцієнт RSF до 18%, що на 50% більше порівняно з обробкою сирого дигестату без додавання речовин.

Щодо розділення сухої речовини, центрифуги демонстрували найвищий середній коефіцієнт SIDM (0,55), що суттєво перевищував показники гвинтових

пресів. Використання другого сепаратора після гвинтового преса збільшувало цей показник у середньому на 20%. Центрифуги зазвичай використовували для сирого дигестату з нижчим вмістом сухої речовини (48 г/л), порівняно з гвинтовими пресами (73 г/л), що також зумовлювало нижче співвідношення концентрацій у рідкій фракції — 0,5 проти 0,7

Найкращі показники сепарації сухої речовини центрифуга досягала під час обробки харчових відходів. Ці результати суттєво перевищували показники при обробці гною або невизначених сумішей. При цьому рідка фракція після центрифугування харчових відходів мала найнижчу концентрацію сухої речовини (11 г/л) та найнижче співвідношення концентрацій — 0,2. Концентрація сухої речовини у рідкій фракції після обробки харчових відходів була на 50% нижча, ніж після гною. Натомість гвинтовий прес краще справлявся з гноєм, відокремлюючи на 60% більше сухої речовини, ніж при обробці харчових відходів. Також гвинтовий прес знижував концентрацію сухої речовини в рідкій фракції гною на 35% (до 76,3 г/л), що суттєво більше порівняно з обробкою рослинних або харчових залишків.

Порівняння сепараційних технологій показало, що концентрація сухої речовини в рідкій фракції після центрифугування була значно нижчою, ніж після гвинтового преса в кожному класі дигестату (за винятком рослинного, де було лише два спостереження. Проте значуща різниця у співвідношеннях концентрацій спостерігалася лише для харчових і невизначених залишків. Для твердої фракції, навпаки, концентрація сухої речовини майже не відрізнялася між технологіями, проте співвідношення концентрацій були суттєво різними у випадку обробки гною.

Застосування реагентів у поєднанні з центрифугою підвищувало середню ефективність сепарації сухої речовини на 18% і знижувало концентрацію у рідкій фракції до 16,1 г/л, що на 30% нижче порівняно з обробкою сирого дигестату. Середнє співвідношення концентрацій для всіх класів дигестату після обробки реагентами становило 0,4. Комбінація гвинтового преса з центрифугою демонструвала стабільні результати між класами дигестату з середньою концентрацією у рідкій фракції 17,3 г/л.

Споживання електроенергії центрифугою та гвинтовим пресом становило в середньому 3,6 і 0,8 кВт·год на тонну сирого дигестату відповідно. Якщо враховувати середній коефіцієнт RSF та концентрацію сухої речовини у твердій фракції, енергоспоживання на тонну сухої речовини становило 137 кВт·год для центрифуги та 31 кВт·год для гвинтового преса. Додавання реагентів до центрифуги знижувало середнє енергоспоживання до 2,1 кВт·год на тонну сиріої маси та до 72 кВт·год на тонну сухої речовини у твердій фракції.

2.2.3.3. Вилучення поживних речовин

Амонійний азот ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) і загальний калій (K) переважно залишалися в рідкій фракції після розділення. Їх середні коефіцієнти вилучення до твердої фракції склали відповідно 0.15 і 0.14, що відповідає середньому коефіцієнту розділення за масою. Коефіцієнти концентрації цих елементів були близькими до одиниці, тобто близько 85% $\text{NH}_4^+\text{-N}$ і загального калію залишалися у рідкій

фазі на тих самих концентраціях, що й у початковому дигестаті. Винятки були зафіксовані при обробці гнойового та рослинного дигестату з використанням хімічних кондиціонерів: у таких випадках концентрації $\text{NH}_4^+\text{-N}$ і K у рідкій фракції були на 10% нижчі, ніж у необробленому дигестаті.

Органічний азот та загальний фосфор у ідеалі мають бути вилучені до твердої фракції. Проте, середні коефіцієнти їх розділення становили лише 0.30 для органічного N та 0.42 для загального P — незалежно від способу обробки або класу дигестату. Центрифуга забезпечила вилучення 33% органічного азоту до твердої фракції, збільшивши його концентрацію у 3 рази (до 6.0 г $\text{N}_{\text{org}}/\text{л}$). Шнековий прес у середньому вилучав менше — близько 20%, але використання другого сепаратора після шнекового преса дозволяло збільшити коефіцієнт розділення до 25%.

За класами дигестату, центрифуга показала найкращі результати при обробці гнойового дигестату — до 55% органічного азоту було відділено у тверду фазу, з концентрацією 6.8 г $\text{N}_{\text{org}}/\text{л}$), тобто коефіцієнт концентрації складав 3.4. Для рослинного дигестату ці показники були нижчими (0.19), але концентрація залишалася подібною (6.6 г $\text{N}_{\text{org}}/\text{л}$). У випадку харчових відходів, комбінація шнекового преса з віброситом забезпечила 43% вилучення органічного N — на 22% більше, ніж при обробці рослинного дигестату.

Для загального фосфору центрифуга забезпечила вилучення близько 50% до твердої фракції — це було на 60% більше, ніж при використанні шнекового преса, і на 15% більше, ніж у шнекового преса з каскадом. Концентрація фосфору у твердій фазі після центрифугування досягала 6.7 г $\text{P}/\text{л}$, що майже в 6.4 рази перевищує початкову концентрацію.

У разі використання хімічних кондиціонерів у поєднанні з центрифугою спостерігалось подвоєння вилучення органічного азоту (0.63) та збільшення розділення загального фосфору на 35% (0.74). Поєднання шнекового преса з центрифугою дозволяло досягати коефіцієнтів вилучення 0.7 для органічного N і 0.8 для загального P . Однак, збільшення коефіцієнта масового розділення на 50% при використанні кондиціонерів призводило до зниження концентрації фосфору у твердій фракції до 3.9 г $\text{P}/\text{л}$.

Найвищі коефіцієнти вилучення органічного азоту і фосфору були досягнуті при обробці гнойового дигестату з кондиціонерами, хоча через обмежену кількість даних статистичне порівняння між класами було неможливим.

2.2.3.4. Енергозатрати на вилучення поживних речовин

Для оцінки ефективності процесу розділення дигестату важливо враховувати не лише ступінь вилучення поживних речовин, а й відповідні енергозатрати. З цією метою було порівняно питомі енергетичні витрати (в перерахунку на 1 кг вилученої речовини) для чотирьох ключових елементів: органічного азоту, загального фосфору, амонію та калію.

Загалом, центрифуги продемонстрували найвищі енергетичні витрати у порівнянні з іншими типами обладнання. Так, для вилучення 1 кг органічного

азоту за допомогою центрифуги в середньому витрачалося близько 250 Вт·год/кг, а у поєднанні з попереднім шнековим пресом — до 270 Вт·год/кг. Для порівняння, використання лише шнекового преса забезпечувало видалення органічного азоту з витратами близько 130 Вт·год/кг, а при використанні каскадної системи — близько 140 Вт·год/кг.

Найменші енерговитрати були характерні для вилучення калію та амонійного азоту. Це пов'язано з тим, що ці елементи залишалися у рідкій фазі, тому їх не потрібно було витягувати механічним шляхом. Проте при оцінці питомих витрат з урахуванням тільки твердої фракції (тобто поживних речовин, дійсно відокремлених від дигестату), спостерігалося різке зростання показника для калію та амонію — в 5–10 разів, що свідчить про неефективність механічного вилучення цих компонентів.

Таким чином, хоча центрифуги забезпечують вищий рівень концентрації фосфору та органічного азоту у твердій фазі, ці переваги супроводжуються значно вищими енергетичними витратами. Це потребує додаткового аналізу доцільності їх використання у залежності від кінцевих цілей переробки та економічних умов господарства.

2.2.4. Обговорення

Обробка дигестату розглядається як перспективна стратегія для покращення управління побічними продуктами біогазових установок. Проте наявні знання щодо повномасштабного розділення дигестату на тверду і рідку фракції залишаються фрагментованими та розрізненими. Багато змінних факторів впливають на ефективність розділення, що ускладнює порівняння результатів між різними дослідженнями.

У межах цього огляду були зібрані та систематизовані наявні дані щодо роботи повномасштабних систем механічного поділу дигестату. Проведено порівняння продуктивності технік розділення залежно від типу обладнання та класу дигестату, а також кількісно оцінено вплив застосування хімічних реагентів.

У процесі постійного вдосконалення біогазових установок та підвищення їх екологічної сталості саме управління дигестатом залишається одним із найважливіших викликів. Цьому питанню приділяється дедалі більше уваги, зокрема в контексті реалізації європейських стратегій розвитку біометану. Розділення дигестату на тверду і рідку фракції зазвичай є першим технологічним кроком, після якого можуть застосовуватись додаткові методи очищення або переробки.

На сьогодні результати досліджень щодо твердорідного поділу дигестату складно порівнювати через відмінності в умовах процесу, методах оцінки та властивостях самого дигестату. До того ж, показники якості фракцій та енергоспоживання часто взагалі не враховуються.

2.2.4.1. Розділення сухої речовини

Основна увага при поділі дигестату традиційно зосереджувалася на вилученні твердих речовин. Відповідно, більшість досліджень оцінює

ефективність обладнання на основі показника розділення за масою та індексу відокремлення сухої речовини.

Одним із запропонованих підходів є класифікація технологій на дві групи: з низькою ($<0,62$) та високою ($>0,62$) ефективністю відділення сухої речовини у тверду фракцію. У межах нашого аналізу середнє значення для кластеру з низькою ефективністю становило 0,36 (на основі 129 спостережень), причому у 11 випадках використовувалася центрифуга з попереднім кондиціонуванням, що дало середній індекс 0,54.

Цікаво, що в межах цього кластеру спостерігалися відмінності між класами дигестату: дигестат на основі енергетичних культур мав середній показник 0,3, тоді як дигестат невизначеного походження (часто на основі суміші агровідходів) — 0,41.

Центрифуги, віднесені до групи з низькою ефективністю, забезпечували найнижчу концентрацію сухої речовини в рідкій фракції — лише 26,3 г/л для сирого дигестату, а застосування реагентів знижувало цей показник ще приблизно на 30%.

У групу високоефективних технологій увійшли переважно випадки обробки кондиціонованого дигестату — всього 40 спостережень, серед яких 19 — із застосуванням центрифуги та 7 — шнекового преса (6 з них — для гнойового дигестату). У цій групі не було зафіксовано істотних відмінностей між типами техніки або класами дигестату за часткою сухої речовини у твердій фракції. Однак, як і в групі низької ефективності, значущі відмінності спостерігалися у вмісті сухої речовини в рідкій фракції при обробці сирого дигестату.

Якщо розглядати твердорідинне розділення як підготовчий етап до подальшої переробки, важливого значення набувають характеристики та якість отриманих фракцій. Так, технічні вимоги для подальшого вилучення амонію або осадження фосфору (наприклад, у формі струвіту) передбачають граничні концентрації сухої речовини у рідкій фракції — не більше 20 г/л для ефективного вилучення амонію та не більше 1 г/л — для процесів осадження фосфору.

Ні одна з груп (ані з низькою, ані з високою ефективністю) не досягла цільового показника 20 г/л. Найкращий результат показала центрифуга — у середньому 23,9 г/л для сирого дигестату, що все одно перевищує допустиму межу, особливо у випадках обробки гнойового дигестату та органічних харчових відходів.

2.2.4.2. Використання хімічних кондиціонерів

Застосування хімічних кондиціонерів вважається ефективним методом зниження концентрації сухої речовини у рідкій фракції до рівня нижче 20 г/л. Наприклад, серед 23 спостережень, де відцентрова сепарація застосовувалась до кондиціонованого дигестату, лише в 4 випадках вміст сухої речовини у рідкій фракції перевищував цей поріг.

У межах комплексної технологічної лінії обробки дигестату (де рідка фракція після шнекового пресу додатково оброблялась у центрифугі) було проведено випробування із застосуванням полімерних флокулянтів у дозах 4–6

г/кг сухої речовини. Попри різні домінуючі субстрати, у всіх випадках концентрація сухої речовини в рідкій фракції залишалась нижчою за 20 г/л.

Дослідження також показали, що збільшення часу перебування дигестату в центрифугі (від 130 до 225 с) та підвищення дози флокулянтів (до 8 г/кг сухої речовини) сприяли подальшому зменшенню концентрації сухої речовини в рідкій фракції. Окрім цього, застосування флокулянтів сприяло переносу амонійного азоту до твердої фракції, що відображається у зниженому співвідношенні концентрації амонію в рідкій фазі до рівня 0,9 для кондиціонованого дигестату.

Разом з тим, існують суперечливі результати щодо впливу флокулянтів на співвідношення розподілу свіжої маси. В одних дослідженнях зазначено, що флокулянти зменшували перехід маси до твердої фракції до 50%, але подвоювали вміст сухої речовини у ній. В інших – вказується на збільшення переходу сухої речовини до твердої фракції, але за рахунок зменшення її концентрації через більшу масу відокремленого матеріалу.

Крім технічних та експлуатаційних аспектів, використання хімічних кондиціонерів потребує врахування їх впливу на довкілля. Наприклад, виробництво поліакриламідів пов'язане з викидами до 2,89 кг CO₂-еквіваленту на кожен кілограм речовини, а питання його довготривалої деградації та екоотоксичності залишаються відкритими.

2.2.4.3. Відновлення поживних речовин

Із сирого дигестату до твердої фракції було відновлено лише 25% органічного азоту. Хоча більшість органічного азоту залишалася в рідкій фракції, рівень його відновлення до твердої фракції був удвічі більший, ніж співвідношення розділення за масою сировини (0,13). Аналогічні результати спостерігалися у попередніх дослідженнях, де при використанні низькоєфективних сепараторів (індекс розділення за сухою речовиною < 0,62) органічний азот також відновлювався вдвічі краще.

Отримані результати підтверджують також високу ефективність використання кондиціонерів для дигестату на основі гною: при використанні центрифуги (як окремо, так і в комбінації) ступінь відновлення органічного азоту у тверду фракцію перевищував 70%. Однак навіть за таких умов, попри високу концентрацію органічного азоту в твердій фракції після центрифугування кондиціонованих дигестатів з гною та рослинної сировини, рідка фракція містила щонайменше 60% загального азоту. У більшості випадків частка амонійного азоту в загальному азоті рідкої фракції не перевищувала 0,9, що є мінімальним порогом, визначеним для RENURE-матеріалів — добрив з переробленого гною, допустимих до використання в зонах, чутливих до нітратного забруднення.

Цей показник вважається критично важливим для ефективного рециклінгу азоту без шкоди для водних ресурсів. Висока частка амонійного азоту у рідкій фракції досягається насамперед завдяки ефективному вилученню органічного азоту до твердої фракції, оскільки амоній зазвичай залишається у рідкій фазі.

Дослідження також показали низьку ефективність технологій обробки сирого дигестату, що вказує на потребу в їх подальшому вдосконаленні.

Водночас результати підкреслюють потенціал для поєднання критеріїв виходу біогазу з показниками якості дигестату. Наприклад, глибше розкладання білків, які є основними макромолекулами у дигестаті, може одночасно підвищити вихід біогазу та збільшити вміст амонійного азоту.

Обробка дигестату сприяє також підвищенню рівня рециклінгу фосфору. У групі з низькою ефективністю розділення (індекс $<0,62$) близько 31% загального фосфору було зосереджено в твердій фракції. У більш ефективній групі (індекс $>0,62$) цей показник сягав 82%. Цікаво, що хоча центрифуги загалом забезпечували вищий рівень відновлення фосфору (до 67%), у досліджуваних повномасштабних установках шнекові преси демонстрували утричі вищий рівень відновлення фосфору у тверду фракцію. Ймовірним поясненням є менший розмір сит, що використовувався на цих установках (від 0,25 до 1 мм), порівняно з експериментальними установками, де застосовувалися сита розміром 1 мм.

Нині зростає попит на тверду фракцію з високим вмістом волокон і низьким вмістом фосфору. Такий матеріал придатний для ґрунтів з високим вмістом фосфору або як альтернатива торфу у продуктах для садівництва. Деякі технології дозволяють додатково вилучати фосфор, зменшуючи його вміст у твердій фракції. Наприклад, процес RePeat передбачає розділення дигестату, кислотну обробку твердої фракції для розчинення мінерального фосфору, а потім осадження фосфору за допомогою лужних реагентів.

За даними повномасштабних біогазових установок, середня концентрація загального фосфору у твердій фракції після центрифугування сирого дигестату з гною становила 8 г/л за ступеня відновлення 65%. Це свідчить про потенційну ефективність застосування процесу RePeat після центрифугування, з метою отримання покращувача ґрунту з низьким вмістом фосфору та вторинного фосфорного продукту.

2.2.4.4. Енергоспоживання

У дослідженні 2023 року споживання електроенергії гвинтовим пресом становило 0,35 кВт·год на кубічний метр необробленого дигестату, тоді як у нашій оцінці цей показник склав у середньому 0,8 кВт·год. Таке суттєве розходження можна пояснити загалом меншою продуктивністю гвинтових пресів у нашій вибірці порівняно з тими, що вивчалися у вказаному дослідженні. Однак вища середня частка сухої речовини, що потрапляє до твердої фракції, може компенсувати різницю, внаслідок чого показник енергоспоживання на тонну виділеної сухої речовини є подібним (приблизно 30,5 кВт·год на тонну сухої речовини). Ймовірно, нижчий рівень вилучення сухої речовини у попередньому дослідженні пояснюється більшим розміром сита в гвинтовому пресі.

Енергоспоживання при обробці необробленого дигестату за допомогою центрифуг було приблизно на 50% вищим, ніж у попередньому дослідженні. Однак через менший вплив кондиціонерів у тій роботі, питоме споживання енергії на тонну сухої речовини, що потрапляє у тверду фракцію, було лише на

10% вищим, ніж у нашому аналізі (близько 80,9 кВт·год на тонну сухої речовини).

Вилучення амонію з біогазових установок відповідає критеріям класифікації «білого аміаку», запропонованої у 2023 році. Застосування такого амонію дає змогу уникнути додаткової фіксації атмосферного азоту, що дозволяє заощадити первинну енергію і зменшити викиди парникових газів, пов'язані з виробництвом азотних добрив.

Попри значні відмінності між технологіями сепарації, середній показник енергоспоживання для отримання однієї тонни амонійного азоту в рідкій фракції становив 1,2 МВт·год. З урахуванням середньої вуглецевої інтенсивності електроенергії в ЄС у 2019 році (275 кг CO₂-екв/МВт·год), виробництво такої кількості амонію супроводжується викидами близько 330 кг CO₂-екв. Це до 30 разів менше, ніж викиди від синтезу аналогічної кількості традиційного азотного добрива за допомогою процесу Габера-Боша. Отримане значення також значно нижче максимально допустимого показника (3 т CO₂-екв/т N), визначеного як орієнтир для кращих екологічних практик у сільському господарстві.

Ці результати свідчать про значний потенціал енергозбереження при вилученні азоту з біогазових установок, що може стати стимулом для подальших досліджень технологій з підвищення концентрації амонійного азоту у дигестаті та його рідкій фракції.

Щодо фосфору, у згаданому дослідженні електроспоживання для вилучення однієї тонни загального фосфору у твердій фракції за допомогою гвинтового преса було вдвічі більшим і склало 9,0 МВт·год/т P. Це пояснюється тим, що там до твердої фракції потрапляло утричі менше фосфору. У нашій роботі аналогічний рівень енергоспоживання (близько 9,0 МВт·год/т P) був зафіксований при використанні центрифуг. При цьому у згаданому дослідженні вплив кондиціонерів на вилучення фосфору був мінімальним. Варто зазначити, що там також застосовували повільніше обертання (менше 5600 об/хв).

Середнє споживання електроенергії для вилучення однієї тонни фосфору у нашому дослідженні склало 6,2 МВт·год/т P, що відповідає приблизно 1,7 т CO₂-екв/т P. Відомо, що виробництво фосфорних добрив супроводжується викидами в межах від 0,92 до 20,4 т CO₂-екв/т P. Хоча економія викидів у порівнянні із заміною синтетичних азотних добрив є меншою, проблема обмежених ресурсів фосфору має стати аргументом на користь перетворення біогазових установок на хаби для його відновлення.

З огляду на оцінку обсягів утворення дигестату в ЄС (180 млн тонн) і середній індекс відділення фосфору (0,5), тверда фракція після сепарації може містити до 0,09 млн тонн фосфору, що еквівалентно приблизно 8% від обсягів використаних фосфорних добрив у 2020 році.

2.2.5. Висновки

Центрифуги забезпечували на 60 % вищу ефективність вилучення сухої речовини та загального фосфору порівняно з шнековими пресами. Водночас, для обробки сирого дигестату центрифуги споживали у 4,5 раза більше енергії, тому

загальні витрати електроенергії на вилучення фосфору були більш ніж удвічі вищими, ніж при використанні шнекового преса.

Вилучення органічного азоту до твердої фракції було низьким для всіх технологій, а частка амонійного азоту, що залишалася в рідкій фракції, становила близько 70 %. При цьому амонійний азот практично не концентрувався, повторюючи розподіл загальної маси. Це свідчить про потребу у вдосконаленні технологій розділення та можливість використання інтегрованих підходів для підвищення як ефективності біогазових установок, так і агрономічної цінності дигестату.

Застосування хімічних кондиціонерів сприяло підвищенню рівня вилучення сухої речовини, органічного азоту та загального фосфору до твердої фракції, причому ефективність перевищувала 60 %. Найвищі показники досягалися для дигестату, отриманого переважно з гною. Крім того, при використанні кондиціонерів вдавалося отримувати рідкі фракції з вмістом сухої речовини нижче 20 г/л, що відповідає вимогам до подальшої глибокої переробки.

Загалом, узагальнення даних з повномасштабних біогазових установок частково підтвердило, що як тип основного субстрату, так і обрана технологія розділення мають суттєвий вплив на ефективність сепарації дигестату та якість утворених фракцій.

За наявності 180 мільйонів тонн дигестату в ЄС і коефіцієнта вилучення фосфору 0,5, тверда фракція може містити до 0,09 млн тонн фосфору, що еквівалентно близько 8 % річного обсягу застосування фосфорних добрив у Європі у 2020 році.

Отримані результати можуть бути корисними для практиків при оцінці ефективності власних процесів розділення та допоможуть у виборі відповідної технології. Також ці дані можуть бути використані як основа для системного аналізу біогазових рішень. У ширшому контексті це підтверджує потенціал біогазових установок не лише як джерел енергії, але й як елементів систем відновлення та переробки поживних речовин у рамках циркулярної економіки

2.3 ОБРОБКА ДАНИХ: ПОКРАЩЕННЯ РОЗУМІННЯ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

2.3.1. Вступ. Незважаючи на проголошену мету сталого розвитку ООН щодо забезпечення доступу до чистої енергії для всіх до 2030 року (ЦСР7), значна частина населення світу – близько 2,3 мільярда людей – досі використовує неефективні та забруднюючі види палива. Це призводить до серйозних наслідків для здоров'я та довкілля: тільки у 2020 році через забруднення повітря в побуті загинуло понад 3 мільйони осіб. Розширення доступу до сучасних, надійних і сталих технологій чистого приготування їжі може стати важливим чинником подолання бідності та досягнення ЦСР7, хоча й потребує подолання низки викликів.

Біогазові установки, які виробляють біогаз і дигестат, є однією з таких технологій. Біогаз зазвичай складається з 40–75 % метану і 25–60 % вуглекислого

газу. Дигестат — це рідке добриво, багате на азот, фосфор і калій, без запаху та патогенів. У великих масштабах біогаз використовують для когенерації електроенергії та тепла або очищують до біометану для транспорту чи газових мереж. У побутовому сегменті, особливо в країнах Глобального Півдня, біогазові установки можуть забезпечити енергією плити, холодильники, зернотертки тощо. Крім того, використання дигестату як добрива приносить доведені екологічні, соціальні та медичні переваги для домогосподарств і громад.

Впровадження побутових біогазових установок підтримується в багатьох країнах Африки та Азії в межах ринкових програм. Проте для масштабування таких рішень необхідно подолати експлуатаційні бар'єри, і тут важливу роль можуть відігравати сучасні системи інтелектуального моніторингу, зокрема з використанням IoT. Такі системи довели свою ефективність у підвищенні надійності, якості обслуговування та оптимізації роботи в інших автономних енергетичних рішеннях.

Виклики впровадження біогазових технологій. Поширенню біогазу перешкоджають соціокультурні, технологічні, екологічні та фінансові фактори. Серед них — одночасне використання різних типів плит, сезонні звички, культурні переконання, питання статусу, а також технічні проблеми: корозія, герметичність установок, утворення конденсату, співвідношення сировини, температура, наявність води та потреба в обслуговуванні. Так, за даними за 2016 рік, понад чверть побудованих у 2009–2013 роках установок у Кенії, Танзанії та Уганді вийшли з ладу.

Методи оцінювання ефективності технологій чистого приготування їжі. Щоб оцінити вплив таких технологій, потрібно враховувати особливості приготування їжі, соціальну динаміку, поведінкові моделі, а також збирати об'єктивні дані для подальшої верифікації результатів і участі в проєктах вуглецевого фінансування. До методів дослідження належать: опитування, напівструктуровані інтерв'ю, спостереження, щоденники приготування їжі та сенсорний моніторинг. Сенсорні рішення дозволяють фіксувати об'єктивні дані про використання плит без втручання у поведінку користувачів, що є особливо цінним у контексті низького рівня писемності.

Моніторинг роботи біогазових установок. Моніторинг охоплює як обсяги виробленого і спожитого біогазу, так і параметри середовища в самій установці. На промислових об'єктах зазвичай відстежують рН, температуру, рівень шламу, тиск, склад газу, а також проводять офлайн-аналіз дигестату (наприклад, ХСК, ТОС, леткі жирні кислоти). Це допомагає стабілізувати процес і максимізувати вихід метану. Проте впровадження моніторингу на побутовому рівні обмежене через складність, високу вартість обладнання та відносно низьку економічну вигоду.

Попри це, потенційні переваги включають: оптимізацію процесу, підтримку обслуговування, підвищення якості сервісу, обґрунтування карбонового обліку, а також можливість аналізу поведінки користувачів. Існуючі дослідження охоплюють обмежену кількість установок, зазвичай не більше двох,

і не мають достатньої тривалості для глибокого аналізу поведінки користувачів з часом.

Застосування дистанційного моніторингу та машинного навчання для біогазових систем у країнах з обмеженими ресурсами. У країнах із низьким рівнем енергозабезпечення, зокрема в регіонах субсахарської Африки, відновлювані джерела енергії дедалі частіше інтегруються з дистанційними технологіями моніторингу та алгоритмами машинного навчання. Ці інновації дають змогу створювати нові моделі надання енергетичних послуг, зокрема в сегменті мікромереж, сонячних домашніх систем і смарт-мереж. Такі технології застосовуються для виявлення деградації освітлювальних елементів, аналізу споживання енергії, ідентифікації несправних акумуляторів та забруднених сонячних панелей, а також для планування обслуговування обладнання. Подібні підходи також ефективно використовуються у водних системах, наприклад, для визначення глибини підземних вод за допомогою вібраційних даних, отриманих з акселерометрів у смарт-колонках.

У сфері біогазу в умовах обмежених ресурсів основні зусилля зосереджуються на розробці доступних систем моніторингу внутрішніх параметрів метантенків. Такі рішення допомагають аналізувати перебіг процесу анаеробного зброджування і загальну ефективність установки. Проте існує низка технічних і фінансових обмежень, що ускладнюють впровадження довготривалого та надійного моніторингу для побутових біогазових установок.

Так, спроби реалізувати низьковартісні системи контролю з вимірюванням температури, тиску, рН і концентрації метану нашкоджуються на проблеми з точністю та довговічністю сенсорів. Наприклад, недорогі датчики метану можуть мати обмежений діапазон вимірювання або бути вразливими до корозії. Електроди для вимірювання рН вимагають регулярного чищення та калібрування, що не завжди є можливим у польових умовах. Комерційні рішення, які демонструють високу точність (наприклад, системи для моніторингу полігонного газу), залишаються занадто дорогими для широкого впровадження в дрібних фермерських господарствах.

Реалізація інноваційних систем моніторингу в реальному часі має значний потенціал для масштабування біогазових рішень, оскільки сприяє покращенню обслуговування користувачів, підвищенню надійності роботи установок і оптимізації експлуатаційних параметрів. Незважаючи на це, досі бракує досліджень, присвячених впровадженню таких рішень саме для біогазових установок у регіонах із обмеженими ресурсами.

Цей розділ має на меті:

- Вивчити характер використання та поведінку користувачів побутових біогазових установок у країнах Східної Африки;
- Продемонструвати цінність IoT-рішень у контексті оцінки відносної ефективності біогазових установок.

Дослідження охопило 121 біогазову установку в межах двох проєктів, реалізованих у Кенії та Уганді в рамках ініціатив Smart Biogas II (2022) і Smart Biogas III (2025). Розроблені цифрові інструменти дають змогу підвищити якість

обслуговування користувачів, підтримати моделі надання біогазу як послуги, а також забезпечити прозорість даних для обліку вуглецевих викидів. У поєднанні з якісними методами аналізу, такі системи можуть стати ефективним інструментом для дослідження моделей впровадження біогазу та поведінки користувачів, що є важливим кроком до забезпечення сталого переходу до чистого приготування їжі.

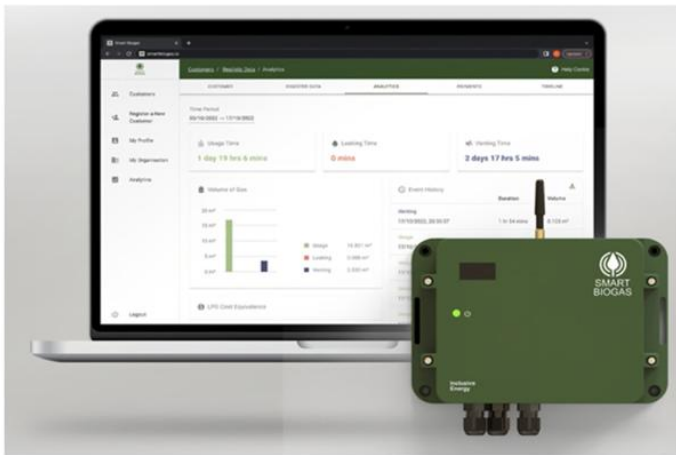
2.3.2 Матеріали та методи

У дослідженні використано систему «Smart Biogas» — пристрій для дистанційного моніторингу, спочатку розроблений благодійною організацією CREATIVenergie за підтримки проєкту «Smart Biogas Network», а згодом комерціалізований компанією Inclusive Energy. Подальше вдосконалення та застосування цієї системи здійснювалось у рамках проєктів Smart Biogas II та III за підтримки Innovate UK.

Польове впровадження відбувалося у співпраці з Kenya Biogas Program (КБР) та Biogas Solutions Uganda Ltd (BSUL), які виступали виконавцями регіональної ініціативи Africa Biogas Partnership (ABP) у Східній Африці. Лічильники Smart Biogas були встановлені на побутові біогазові установки в домогосподарствах-учасниках біогазових програм у Кенії та Уганді. Первинний збір даних здійснювали КБР, BSUL та Inclusive Energy, а це дослідження базується на вторинному аналізі наданої інформації. Всі учасники надали інформовану згоду на збір та обробку даних від своїх установок.

Дослідження охоплювало біогазові установки, встановлені в рамках моніторингу викидів вуглецю відповідно до методології «Gold Standard», зокрема в процесі оцінки ефективності споживання палива (Performance Fuel Testing – PFT). З-поміж приблизно 8000 установок, встановлених у двох країнах, домогосподарства для дослідження обиралися методом простого випадкового відбору. У разі відмови чи несправності обладнання проводилась заміна на інші випадково відібрані домогосподарства. У підсумку дослідження охопило 121 біогазову установку.

Систему Smart Biogas встановлювали між біогазовим реактором і кухонною плитою (**рис. 2.3.1**). Вона дозволяє вимірювати обсяг спожитого біогазу та статичний надлишковий тиск у реакторі (різницю між атмосферним тиском і тиском у реакторі), забезпечуючи об'єктивні дані про довготривале використання біогазу. Вебплатформа дозволяє моніторити дані в реальному часі через інтерактивну панель управління, відслідковувати обслуговування, здійснювати розрахунки та управляти мережею установок.



(a)



(b)

Рис. 2.3.1 (a) Блок Smartbiogas та веб-панель керування; (b) Лічильник SmartBiogas, встановлений на кухні поруч із плитою.

Система сумісна з усіма основними типами побутових біогазових установок: з рухомим газовим куполом, стаціонарним куполом та гнучкими полімерними мішками.

Для вимірювання тиску застосовуються два датчики: кремнієвий сенсор MPX12 для статичного тиску в діапазоні 0–10 кПа та диференціальний сенсор Sensirion SDP800 для контролю витрати газу у межах 0–500 Па. Диференціальний сенсор під'єднано до сопла Вентурі. Обчислення витрати відбувається безпосередньо на мікроконтролері пристрою, що забезпечує автономну роботу системи у разі тимчасової втрати зв'язку. Це дозволяє точно фіксувати споживання навіть при тривалих перервах у передачі даних.

Захист сенсорів від агресивного біогазового середовища здійснюється через фільтрацію потоку через осушувач і фільтр сірководню (H_2S). Вся система змонтована в герметичному корпусі класу захисту IP65, виготовленому з вогнетривкого HDPE, що гарантує її стійкість до зовнішніх впливів.

Датчик MPX12 потребує зовнішньої температурної компенсації, яка реалізується за допомогою мікроконтролера STM32L072CZ. Обробка сигналу з цього датчика здійснюється операційним підсилювачем MCP6271T, що підсилює та фільтрує вихідний сигнал. Поєднання температурної компенсації та обробки сигналу забезпечує високу точність вимірювання тиску в робочому діапазоні температур від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Диференціальний датчик тиску SDP800 побудований на запатентованій технології CMOSens®, яка об'єднує сенсорний елемент, цифрову обробку сигналу та калібрування на одному CMOS-чипі (рис. 2.3.2).

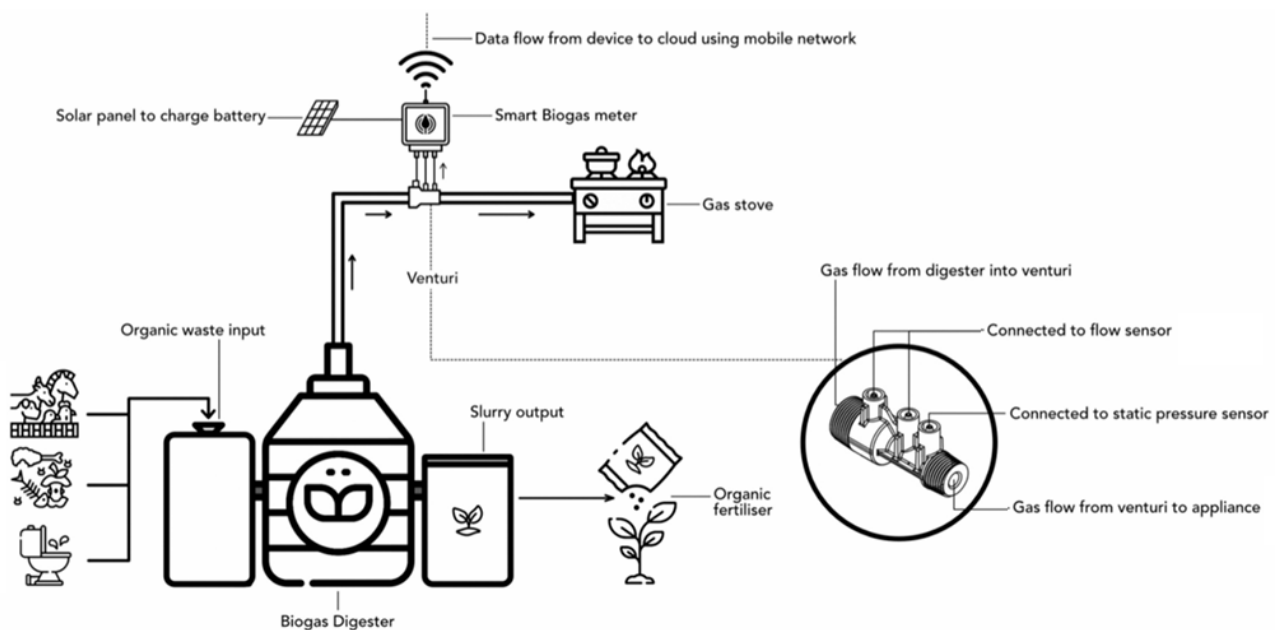


Рис. 2.3.2 Система Smart Biogas встановлюється між піччю та біогазовим реактором, а також піччю та контролює статичний тиск і потік газу.

Така інтеграція забезпечує компенсацію дрейфу сенсора та високу відтворюваність результатів — стабільність нульового зсуву становить менш ніж 0,05 Па/рік. Вбудована температурна компенсація діє в діапазоні від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє досягати точності нульової точки 0,1 Па та похибки в межах 3% від значення. Ці характеристики є особливо важливими для застосування в біогазових системах, де критичною є довготривала стабільність вимірювань. За результатами дворічної експлуатації в полі, компанія Inclusive Energy відзначила, що дрейф сенсора практично відсутній.

Компанія Inclusive Energy пропонує два варіанти системи: стандартний — для очищеного біогазу (точність $\pm 5\%$) і розширений — для сирого газу з високим вмістом вологи та агресивних компонентів (точність $\pm 7\%$). Обидва варіанти зберігають свої характеристики протягом усього строку експлуатації завдяки стабільності технології CMOSens®.

Живлення системи забезпечується за допомогою малої сонячної панелі, що заряджає літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO_4). Дані з кожного сенсора зчитуються кожні 5 мс, середнє значення за хвилину зберігається у пам'яті та передається на сервер Smart Biogas щогодини. Система здатна зберігати локальні дані за останні 42 дні завдяки використанню мікроконтролера STM32L072CZ з 192 КБ флеш-пам'яті та 20 КБ оперативної пам'яті. Архітектура зберігання оптимізована для одночасної обробки двох потоків даних. Для цього реалізовано кільцевий буфер у флеш-пам'яті, який дозволяє безперервний збір даних із постійним оновленням.

Система використовує модуль SIM800L, що підтримує мережі 2G та підключається до мікроконтролера через інтерфейс UART. У разі наявності зв'язку дані передаються на сервер, а у разі його відсутності — накопичуються в локальній пам'яті. Як тільки з'єднання відновлюється, пристрій автоматично

надсилає раніше збережені дані, що гарантує їх збереження навіть під час тимчасових збоїв зв'язку.

Методологія аналізу

Цей розділ присвячено демонстрації можливостей дистанційного моніторингу біогазових установок за допомогою простих і недорогих сенсорів, а також методам аналізу даних, що дозволяють виявляти поведінкові шаблони користувачів і порівнювати ефективність роботи різних установок. Метою дослідження було не стільки охоплення всіх типів установок, скільки показ цінності таких підходів для організацій, які впроваджують біогазові системи на рівні домогосподарств.

Аналіз даних було зосереджено на двох напрямках:

- Виявлення індивідуальних шаблонів використання біогазових установок на основі даних тиску та витрати газу в реальному часі — як доповнення до традиційних якісних методів збору інформації.
- Порівняльний аналіз декількох установок з метою виявлення закономірностей у використанні та оцінки їх відносної ефективності.

Виділення ознак щоденного використання

Аналіз проводився у добовому розрізі, що відповідає типовим добовим ритмам людської активності. Упродовж року вироблення й споживання біогазу зазнають впливу сезонних коливань у постачанні сировини, умов змішування, потреб у приготуванні їжі тощо. Урахування таких факторів дозволяє краще інтерпретувати змінність даних між домогосподарствами.

Для виявлення змін у поведінці користувачів на тривалих часових проміжках з кожного набору даних, що збиралися з хвилинною дискретністю, було виділено ключові добові ознаки, які характеризують роботу установки протягом 24 годин. Вивчення динаміки цих ознак дає змогу оцінити сезонні особливості використання біогазу.

Для прикладу на рисунку (рис. 2.3.3) наведено графік тиску та витрати газу за три дні. Оскільки вихідні дані мають значний рівень шуму, для підвищення інформативності було застосовано метод локального згладжування (LOWESS), який дозволив виділити основні тренди та екстремуми в поведінці системи.

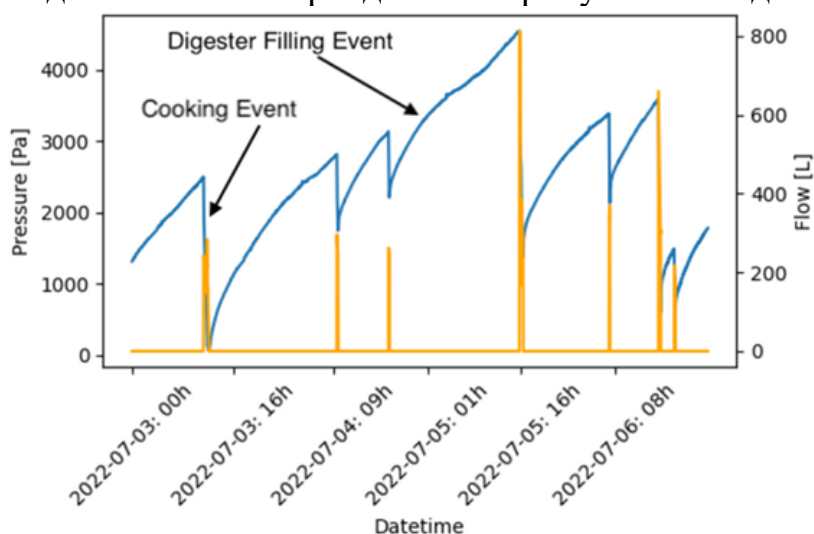


Рис. 2.3.3 Приклад даних про роботу дигестора за три дні. Синя лінія показує манометричний тиск у дигесторі, а жовта лінія — потік біогазу до кухонної плити. Піки в даних про потік відповідають періодам використання дигестора.

Оскільки на вироблення та споживання біогазу впливають різноманітні чинники (швидкість завантаження, тип сировини, співвідношення з водою, температура тощо), результати аналізу поєднували з середніми щоденними метеорологічними даними для кожного об'єкта, включаючи температуру повітря та ґрунту, а також кількість опадів. Це дозволило виявити можливі метеозалежні патерни в роботі біогазових установок.

Робота установок чітко корелює з повсякденними домашніми звичками. Проте вона змінюється протягом року під впливом таких факторів, як сільськогосподарський сезон, шкільні графіки або візити родичів. Розуміння цих динамік дозволяє глибше проаналізувати реальні сценарії використання та рівень прийняття технології.

Для цього було розроблено графік «розподілу використання біогазу за часом доби». Дані групувалися за годинами, й для кожної години обчислювались середні значення трьох параметрів:

- Середня тривалість приготування їжі — середня тривалість подій приготування їжі в межах кожної години протягом вибраного періоду. Представлена у вигляді стовпчиків.
- Ймовірність готування — частота, з якою у певну годину відбувалися події використання біогазу. Відображається другою віссю Y.
- Інтенсивність використання — середня швидкість витрати біогазу під час приготування їжі, яка показана кольоровим тоном стовпчиків. Темніші відтінки свідчать про більшу інтенсивність споживання.

Такий візуальний підхід дозволяє виявити типовий ритм використання біогазу в домогосподарствах і робить можливим порівняння між установками, домогосподарствами та сезонами.

Візуалізація трьох ключових параметрів — тиску, витрати газу та часу — на одній осі дає змогу зрозуміти типові патерни приготування їжі в домогосподарствах: коли саме це відбувається, скільки часу триває подія та якою є інтенсивність споживання біогазу. Порівняння таких графіків у різні періоди (наприклад, по місяцях) дозволяє виявити сезонні зміни в профілях використання.

Цей стиснутий формат подання даних відображає ключові індикатори реального споживання і дає уявлення про побутові звички. Наприклад, можна побачити, як саме готують їжу — тривалим томлінням (наприклад, для рагу) у певні години дня чи короткими, інтенсивними циклами (наприклад, смаженням) в інший час доби.

Показник утилізації біогазу (Biogas Utilisation Factor, BUF)

У біогазових програмах застосовують широкий спектр установок різного об'єму та конструкції, продуктивність яких залежить від місцевих умов і звичок

користувачів. Щоб мати змогу порівнювати, наскільки ефективно різні домогосподарства використовують доступний біогаз, запроваджено показник BUF — коефіцієнт утилізації біогазу. Цей індикатор демонструє, чи використовується біогаз повністю, чи частина метану втрачається через стравлювання або витоки.

BUF — це співвідношення фактично використаного біогазу до обсягу згенерованого за певний період (зазвичай доба). Він аналогічний до показників ефективності виробництва, що застосовуються в промисловості.

Нехай:

$u(t)$ — миттєва витрата біогазу в момент часу t , л/год;

$g(t)$ — миттєва швидкість утворення біогазу в момент часу t , л/год;

$U(T)$ — загальний обсяг використаного біогазу за період T ;

$G(T)$ — загальний обсяг виробленого біогазу за той самий період.

Тоді BUF визначається як:

$$BUF = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{du}{dt} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \frac{dg}{dt} dt} = \frac{U(T)}{G(T)}$$

Методи розрахунку BUF

Враховуючи неможливість прямого вимірювання утворення біогазу зі стандартними сенсорами, було запропоновано два підходи для розрахунку BUF:

1. Аналіз за градієнтом тиску з використанням витратоміра.

Цей метод поєднує дані сенсора тиску з вимірами витрати біогазу. Швидкість зростання тиску в періоди, коли газ не споживається (наприклад, після завершення готування), дозволяє оцінити базову швидкість продукування газу, яку вважають сталою протягом доби. Під час приготування їжі витратомір безпосередньо фіксує споживання газу. Віднімаючи постійну швидкість продукування з загальної зміни тиску, отримують скориговану криву, яка відображає лише споживання. Інтегрування цієї кривої дає оцінку об'єму згенерованого газу. Для точного перерахунку застосовують калібрувальний коефіцієнт α , отриманий шляхом емпіричного порівняння з вимірами витратоміра.

2. Оцінка за часом стравлювання.

Другий підхід ґрунтується на аналізі періодів, коли тиск у біореакторі досягає максимуму й не змінюється, тобто відбувається стравлювання газу. Якщо припустити, що продукування газу є постійним, то тривалість такого стравлювання відповідає частці біогазу, що не була використана. BUF тоді обчислюється як:

$$BUF = 1 - \frac{t_v}{t_T}$$

де T — загальний інтервал часу (наприклад, місяць), а t_v — сумарний час стравлювання в межах цього інтервалу.

Обидва методи мають певні обмеження: перший є чутливим до коливань тиску і припускає сталість продукування газу, другий не дозволяє детально простежити денні шаблони використання, але дає змогу оцінити рівень утилізації за тривалий період. Разом ці підходи доповнюють один одного й дозволяють виявити як ефективні, так і неефективні сценарії використання біогазових установок.

Кластеризація та виявлення аномалій у даних біогазових установок

Однією з цілей цього дослідження було виявлення закономірностей у даних, що надходять з біогазових установок, зокрема щодо особливостей їх експлуатації. Кластеризація є ефективним інструментом для виявлення подібних шаблонів.

Кластеризація — це процес поділу набору даних на природні підгрупи, у яких спостереження мають схожі характеристики, тоді як міжгрупові відмінності суттєві. За допомогою алгоритмів кластеризації можна ідентифікувати структури та поведінкові шаблони у часових рядах, групуючи подібні дані.

Для цієї мети було використано алгоритм k-середніх (k-means), який дозволяє знаходити подібності у щоденних показниках, що описують роботу установок, а також виявляти аномалії. Метод передбачає розбиття n спостережень на k кластерів, у яких кожне спостереження належить до кластера з найближчим середнім значенням.

Щоб виявити повторювані шаблони, було розраховано ковзні статистики для вибраних параметрів. Вікно ковзного аналізу обиралось залежно від типу шаблону: наприклад, 2–3 місяці — для сезонних змін, або коротші — для швидких реакцій.

Для виявлення впливу тривалості приготування їжі та кількості опадів на роботу установки, наприклад, можна кластеризувати параметри «Сума опадів» і «Середній час приготування їжі» за допомогою короткого ковзного вікна. Для цього використовуються такі статистики, як середнє, медіана, стандартне відхилення, асиметрія, ексцес та ентропія. Масштабування ознак є необхідним, аби уникнути упередженості, зумовленої різними одиницями виміру.

Для вибору кількості кластерів застосовуються різні підходи, зокрема індекс Калішінські-Харабаза або дендрограми. Наприклад, у випадку з приготуванням їжі та опадами варто спочатку обрати два кластери для виявлення найбільш контрастних підгруп, а потім уточнити кількість.

Після визначення кількості кластерів алгоритм k-середніх реалізовано в середовищі Python за допомогою бібліотеки scikit-learn. У результатах дослідження наведено приклади використання цього підходу як для окремої установки, так і для груп подібних установок, з можливістю масштабування на декілька країн.

Виявлення аномалій

Для виявлення аномалій використано алгоритм MinClusterDetector, заснований на кластеризації методом k-середніх. Цей підхід дозволяє виявляти

значні зміни в поведінці системи, наприклад, за показниками щоденного споживання та максимального тиску в газовій камері установки. Кожна точка в часовому ряді розглядається як незалежне спостереження у багатовимірному просторі. Точки, що належать до найменших кластерів, вважаються аномальними.

Метод ефективний для фіксації суттєвих змін стану системи, зокрема потенційних збоїв або аварій. Хоча він менш чутливий до поступових змін, його можна комбінувати з іншими методами аналізу часових рядів, зокрема декомпозицією STL для трендів і сезонності, ARIMA для прогнозування або LSTM-мережами для складних часових залежностей.

Метод є обчислювально ефективним і масштабованим, що робить його придатним для моніторингу великої кількості установок у режимі реального часу. Крім того, він є інтерпретованим: аномалії легко ідентифікуються як малі кластери, що суттєво відрізняються від основної маси даних.

Для реалізації алгоритму використовувалась бібліотека ADTK (Anomaly Detection Toolkit). Параметри для кластеризації включали загальне добове споживання та максимальний статичний тиск, що є критично важливими показниками ефективності роботи установки. Початкова кількість кластерів була обрана як 3, однак розглядалися й альтернативні варіанти.

Статистичне підтвердження

Після побудови кластерів їх розподіли було візуалізовано за допомогою вілін-графіків. Для перевірки статистичної значущості різниць між кластерами використовувалися непараметричні тести, наприклад, тест Манна–Уїтні. Він дозволяє оцінити відмінності між двома незалежними групами і є стійким до викидів.

У наступному розділі представлено приклади практичного застосування методів кластеризації та виявлення аномалій до наборів даних біогазових установок, а також висновки, отримані в результаті цього аналізу.

2.3.3. Результати та обговорення

Очищення та якість даних

Система Smart Biogas здійснювала моніторинг протягом 518 днів — з 1 березня 2022 року до 31 липня 2023 року. Упродовж цього періоду спостерігалися втрати даних через технічні проблеми, зокрема погане підключення до мережі, несправності або втручання в роботу лічильників. Два біогазові реактори взагалі не передавали дані, тому були виключені з подальшого аналізу.

Дані збиралися з інтервалом в одну хвилину. Мінімальною одиницею аналізу був один день. Дні з понад 5% відсутніх даних не враховувалися. Загалом 115 реакторів мали щонайменше один повний день даних: 61 у Кенії та 54 в Уганді. У Кенії було зібрано 19 205 повних «днів реакторів» (60% можливих днів), в Уганді — 17 163 (61%).

Для поздовжнього аналізу враховувалися лише ті реактори, які передали понад 80% даних за весь період, що дозволило виявити сезонні зміни. У Кенії таких реакторів було 57%, в Уганді — 56%. Варто зазначити, що в Кенії вищий відсоток установок мав тривалий період повних даних: 30% працювали понад 6 місяців безперервно, ще 33% — від 4 до 6 місяців. В Уганді ці показники склали 19% і 35% відповідно.

Результати аналізу даних

Аналіз проводився на двох рівнях:

- індивідуальний аналіз одного реактора,
- порівняльний аналіз групи реакторів.

Індивідуальний аналіз побутових біогазових установок

Цей розділ демонструє, як дані про тиск і витрату біогазу можна використовувати для оцінки моделей готування окремих домогосподарств. Наприклад, тривалість приготування їжі або обсяг спожитого пального дозволяють аналізувати вподобання користувачів і зміни в їхній поведінці протягом року. На відміну від попередніх досліджень, які враховували багато технічних параметрів, дане дослідження доводить, що навіть прості вимірювання тиску та витрати дають цінну інформацію. Такий підхід відповідає висновкам Bisaga та співавт. щодо систем сонячного живлення.

Для прикладу використано 6-кубовий цегляний реактор типу BSU2015 (ідентифікатор 28W2oA), розташований у регіоні Мпігі (Центральна Уганда). Установкою користується сім'я з п'яти осіб (троє чоловіків і двоє жінок), основне призначення — приготування їжі.

Поздовжні зміни в експлуатації

Побудова графіків за характеристиками реактора та метеоданими дозволяє виявити тренди, сезонні коливання та зв'язки:

Рис. 2.3.4А і **2.3.4В**: демонструють виробництво біогазу за методикою 1 (розділ Biogas Utilisation Factor (BUF)). На **рис. 2.3.4А** видно затриману кореляцію з кількістю опадів (оскільки реактор заправлявся дощовою водою). На **рис. 2.3.4В** така залежність відсутня — тут використовується водопровідна вода.

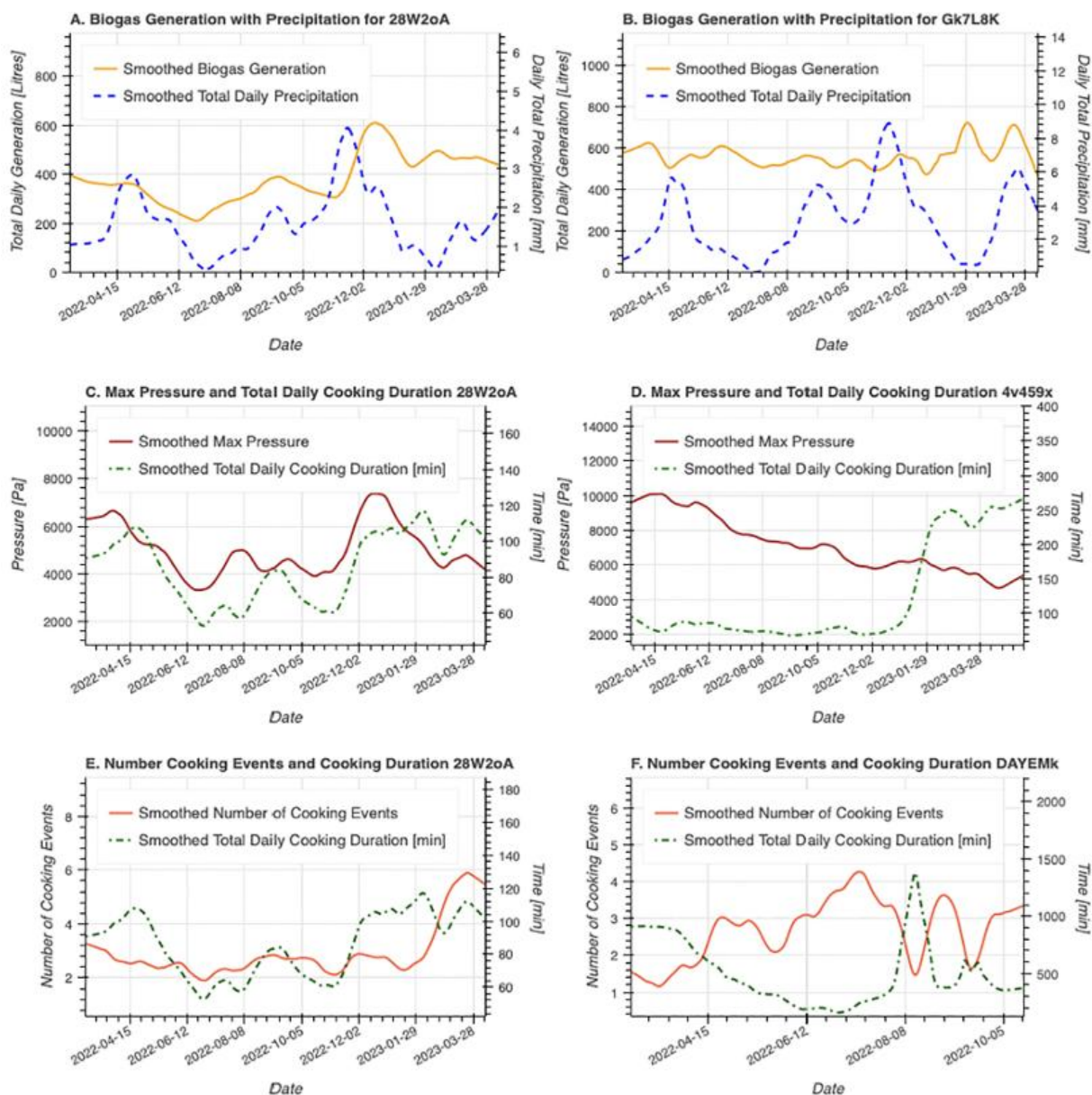


Рис. 2.3.4 Приклади поздовжніх графіків характеристик за період моніторингу. Дані згладжено. (А-В) Генерація біогазу, відображена разом із загальною добовою кількістю опадів; (С D) Максимальний добовий манометричний тиск у біореакторі, відображений разом із загальною добовою тривалістю приготування; (Е-Ф) Загальна кількість щоденних процесів приготування разом із загальною добовою тривалістю приготування.

Рис. 2.3.4С і **2.3.4D**: максимальний тиск під час приготування їжі порівнюється з тривалістю готування. На **рис. 2.3.4С** — позитивна кореляція (ефективне використання газу). На **рис. 2.3.4D** — тиск знижується з часом, при цьому час приготування короткий (~15–20 хв/день), що свідчить про ймовірне недозавантаження.

Рис. 2.3.4Е і **4F**: кількість та тривалість приготування їжі на день. **Рис. 2.3.4Е** — стабільне використання (~3 події/день), а **рис. 2.3.4F** — вища мінливість, у т.ч. період меншого використання 12 червня 2022 року.

Ці приклади ілюструють важливість комплексного підходу, зокрема поєднання технічних та соціокультурних факторів (наприклад, сезонність, сільськогосподарські цикли, традиції, структура домогосподарства тощо).

Індекс використання біогазу (BUF)

BUF обчислювався для всіх реакторів як відсоток ефективного використання біогазу. На відміну від традиційних підходів, що аналізують рН, температуру тощо, BUF дозволяє порівнювати ефективність між різними типами установок. Цей підхід відповідає рекомендаціям Robinson та ін. щодо потреби в оцінці реального використання установок.

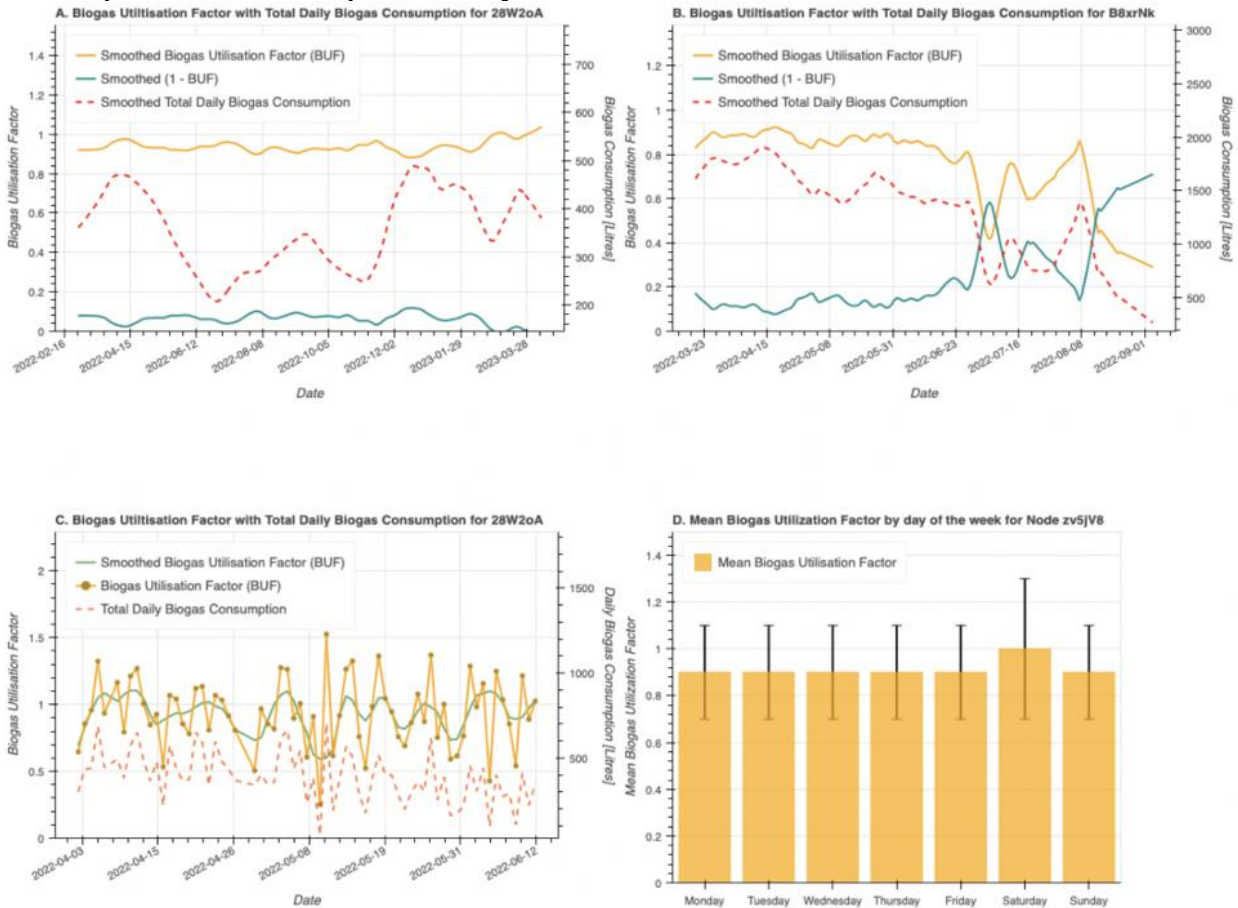


Рис. 2.3.5 (А-В) Згладжений коефіцієнт використання біогазу (BUF) та (1-BUF) нанесені на графіки разом із загальним добовим споживанням біогазу на вторинній осі у; (С) Показано крупний план необроблених даних про використання та споживання біогазу; (D) показано приклад середнього BUF для кожного дня тижня для даного біореактора.

Рис. 2.3.5А: показує постійно високий BUF (~100%) для реактора 28W2oA — це свідчить про ефективне використання газу. Смугова лінія відображає середній BUF, а значення (1-BUF) — потенційні втрати газу через скидання або невикористання.

Рис. 2.3.5С: демонструє щоденні коливання BUF — частина днів із надлишком, частина — з нестачею (споживання з резерву).

Рис. 2.3.5D: виявляє незначну перевагу у використанні біогазу по суботах. Це відкриває можливості для накопичення газу в будні для його активного використання у вихідні, зменшуючи втрати.

Кластеризація для виявлення закономірностей у поведінці.

Для ілюстрації методології кластерного аналізу, описаної в розділі про коефіцієнт використання біогазу (BUF), було досліджено взаємозв'язок між кількістю опадів та середньою тривалістю приготування їжі на прикладі одного біогазового реактора. Параметри «сума опадів» та «середня тривалість приготування» були згруповані у два кластери ($k = 2$) із використанням ковзного вікна на 7 днів та алгоритму k -середніх. Щоб уникнути впливу різних масштабів змінних, перед кластеризацією було застосовано стійке масштабування.

Результати кластеризації були візуалізовані за допомогою графіків типу «скрипка» (рис. 2.3.6). Статистичну значущість відмінностей між кластерами оцінювали за допомогою критерію Манна-Вітні. Було встановлено значущі відмінності між кластерами як за кількістю опадів (p -значення: $1.02e-46$), так і за тривалістю приготування їжі (p -значення: $8.21e-13$). Результати вказують на схильність готувати довше під час періодів із високими опадами (кластер 1) та коротше — за умов меншої кількості опадів.

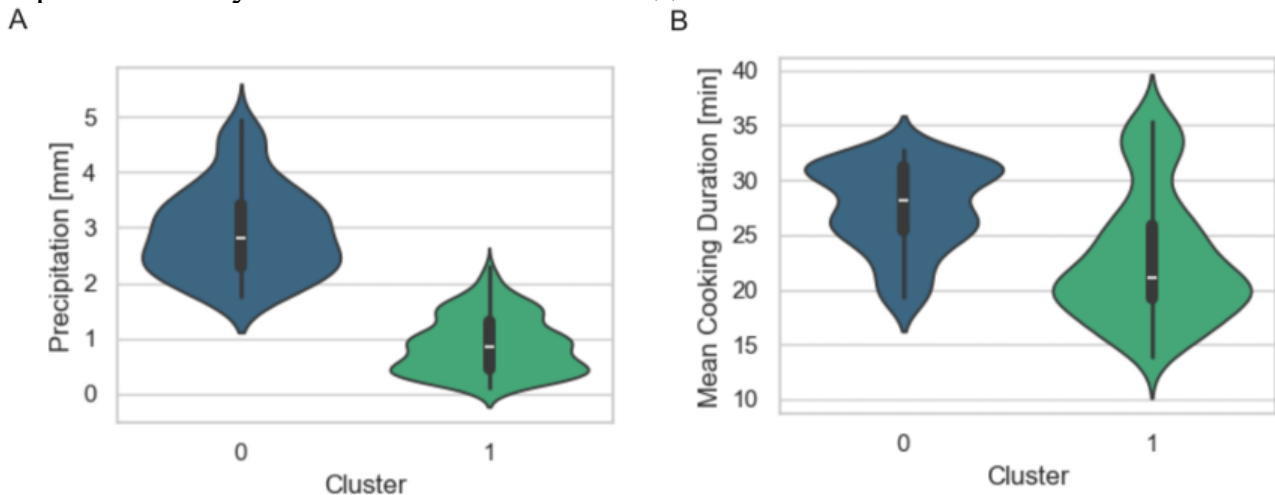


Рис. 2.3.6 Скрипкові діаграми, що показують різницю в розподілах двох кластерів, знайдених у даних.

Цей приклад демонструє, як кластерний аналіз може бути ефективним інструментом для виявлення закономірностей у часових рядах, зокрема для аналізу впливу погодних умов на поведінку користувачів біогазових систем. Збір даних від мережі установок може допомогти програмам біогазу краще зрозуміти поведінкові особливості в різних умовах і розробити цільові заходи підтримки цілорічної експлуатації.

Виявлення аномалій.

Для двох ключових експлуатаційних параметрів — максимального тиску в системі та обсягу споживаного біогазу — було застосовано алгоритм виявлення аномалій на основі кластеризації (див. розділ BUF). Дані з установок, де раніше спостерігались проблеми, дозволили класифікувати спостереження на три стани: «нормальний рівень», «низькі значення» та «аномалії». Ці категорії відповідають різним режимам роботи, що дозволяє виявити суттєві відхилення від стандартної поведінки біореактора.

Ефективність підходу показано на **рис. 2.3.7**. Зокрема, **рис. 2.3.7В** демонструє здатність алгоритму виявляти періоди поступового зниження параметрів, що передували повній відмові системи. У цьому випадку завчасне виявлення могло б дати змогу провести профілактичне обслуговування.

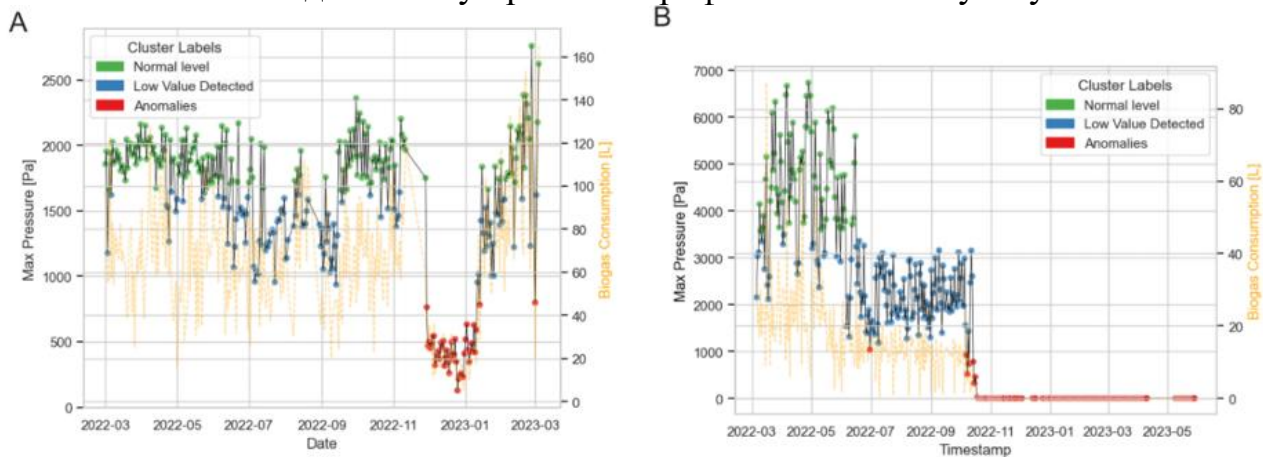


Рис. 2.3.7 Приклади алгоритму виявлення аномалій на практиці, з максимальним добовим манометричним тиском, що відображається разом зі споживанням біогазу. (А) показує раптове падіння максимального манометричного тиску та загального добового споживання, яке не прямує до нуля, але є значним відхиленням від середньої поведінки. (В) показує два падіння - значне падіння, а потім падіння до 0, можливо, спричинене витоком з біореактора.

Алгоритм, навчений на наборах даних із відомими аномаліями, може бути використаний для аналізу інших установок. Це дозволяє програмам біогазу дистанційно виявляти проблеми в роботі та покращувати якість обслуговування. Хоча метод розглядає кожну точку в часі як незалежну, він залишається ефективним для виявлення суттєвих відхилень, що потребують втручання.

Запровадження такого підходу забезпечує ефективне автоматизоване моніторингування та раннє виявлення проблем. Якщо алгоритм виявляє не лише збої, а й передумови до них (наприклад, «низький рівень» перед відмовою), програми можуть покращити час реагування та якість сервісу. У подальших дослідженнях доцільно дослідити інші алгоритми аналізу часових рядів, які краще враховують сезонні коливання та часову послідовність даних. Це підвищить точність виявлення аномалій та дасть змогу будувати більш надійні системи раннього попередження для експлуатації біогазових установок.

Щоденні звички приготування їжі: аналіз за часом доби

У розділі, присвяченому методології аналізу, показано, як візуалізація середніх моделей використання біогазу протягом 24 годин дозволяє глибше зрозуміти щоденні звички домогосподарств. Графіки «розподілу споживання за часом» ілюструють поведінкові патерни біогазового використання. На **рис. 2.3.8** зображено приклади чотирьох домогосподарств з різними режимами споживання біогазу. Цей підхід до візуалізації базується на методах моніторингу твердопаливних плит адаптований спеціально до біогазових систем. На **рис.**

2.3.8А зображено домогосподарство з біогазовим реактором об'ємом 9 м³, який використовується регулярно. Родина повідомляє про використання альтернативного палива лише тоді, коли закінчується біогаз. Проте коефіцієнт використання біогазу (**рис. 9А**) свідчить про наявність невикористаного потенціалу. Графік показує, що приготування їжі переважно відбувається о 6 ранку (близько 30 хвилин) і повторно між 16:00 та 17:00, а також у інші періоди доби.

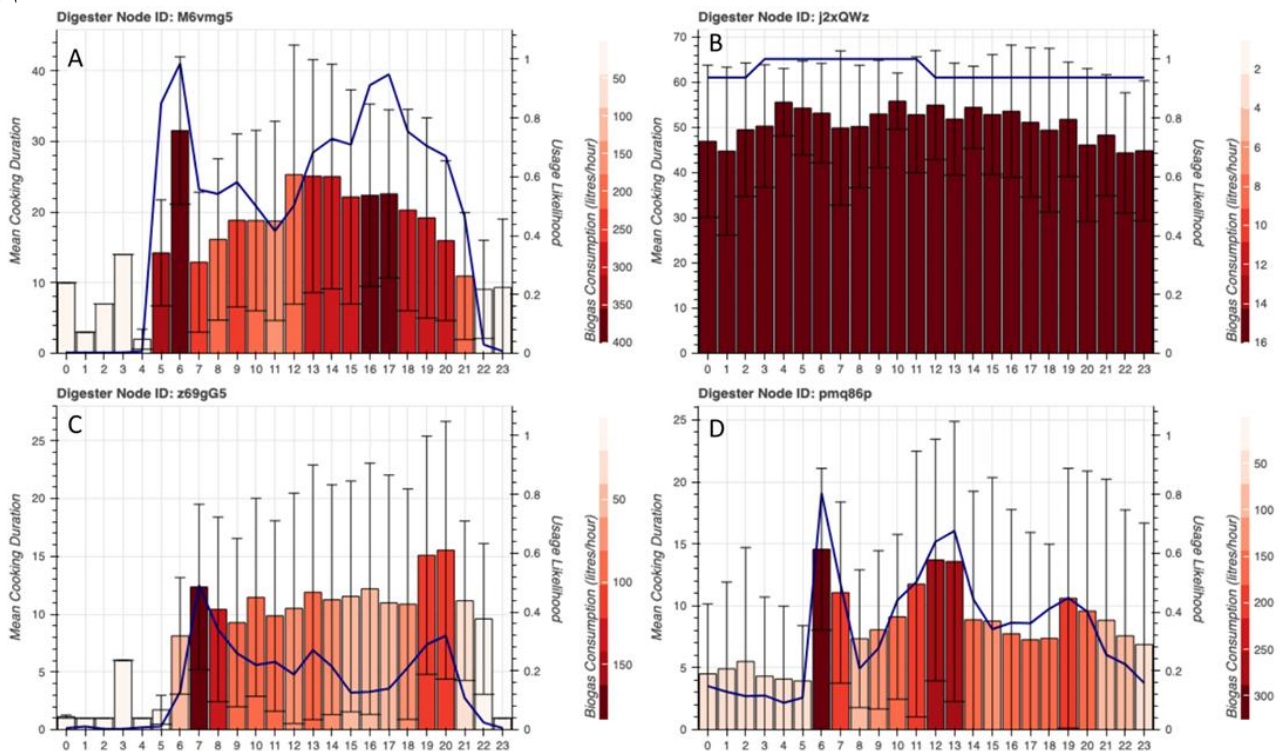


Рис. 2.3.8 Графік використання біогазу для різних дигесторів. (А) 9 м³ Дигестор BSU2015 на висоті 1151 м – 10 осіб. (В) 30 м³ чоловіка (С) 6 м³ Дигестор Sistema Biobolsa на висоті 1146 м. 6 осіб .(D) 6 м³ Дигестор BSU 2015 на висоті 1197 м. 6 осіб .

Рис. 2.3.8В демонструє використання біогазу у системі з реактором на 30 м³. Хоча лінія ймовірності використання (синя) вказує на часте застосування протягом дня, фактичне споживання біогазу становить лише близько 16 л/год — значно менше за типовий рівень для приготування їжі (150–400 л/год). Такий низький постійний рівень подачі може свідчити про витіки через плиту, що часто трапляється у випадках низької якості обладнання.

Рис. 2.3.8С демонструє порівняно короткі та нерегулярні періоди приготування їжі. При цьому рис. 9В фіксує зниження рівня генерації біогазу протягом року. Незважаючи на це, вироблений біогаз залишився недовикористаним.

Рис. 2.3.8D ілюструє приклад, коли біогазова система застосовується переважно вранці та вдень. Хоча час приготування короткий, коефіцієнт використання реактора становить 0,9. Водночас записи вказують на недостатнє внесення сировини, що призводить до неповного завантаження та неефективної роботи системи.

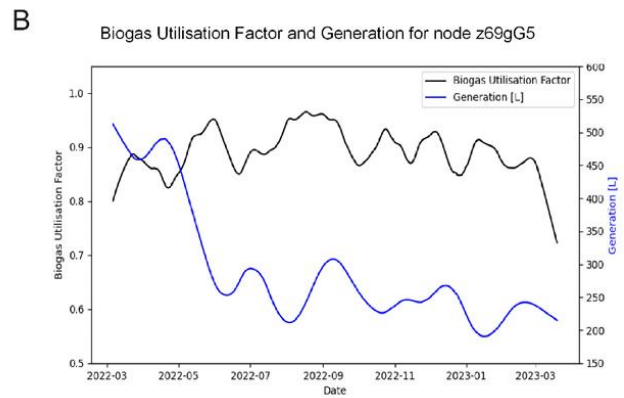
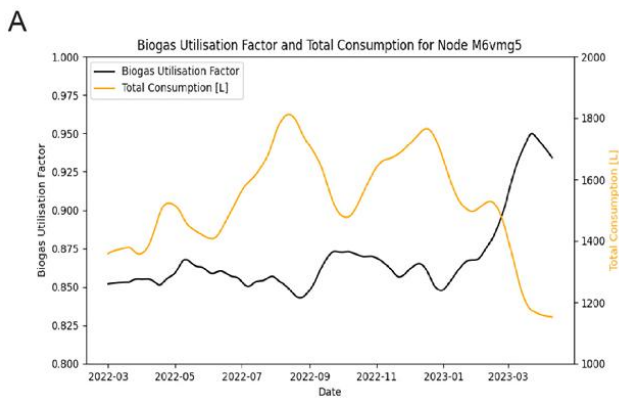


Рис. 2.3.9 (А) Коефіцієнт використання біогазу (ВУФ), побудований разом зі Споживанням для вузла М6vmg5, того ж вузла, що зображено на рис. 10. (В) Коефіцієнт використання біогазу (ВУФ), побудований разом зі Виробництвом для вузла z69gG5

Такі візуалізації дозволяють краще зрозуміти індивідуальні патерни використання біогазових систем. Поєднання їх з якісними методами збору інформації здатне надати глибше уявлення про поведінку користувачів.

Порівняння колекцій біогазових установок

Важливо оцінювати, як різні установки використовуються відносно одна одної. Це може допомогти програмам підтримки виявити, які установки використовуються ефективно, а які — недостатньо. Поєднання кількісного аналізу з якісним розумінням поведінкових моделей дає змогу краще спрямовувати навчання та підтримку користувачів.

Рис. 2.3.10А демонструє *ridge*-графік розподілу споживання біогазу в 6 м³ установках однакової конструкції в Уганді, але з різними моделями використання. **Рис. 2.3.10В** показує згладжені розподіли коефіцієнтів використання біогазу для цих самих установок. У деяких випадках, як-от Х95ZB5, спостерігається широкий розподіл, а в інших — різко виражений пік. Загалом, нижчий рівень виробництва біогазу часто корелює з вищою варіативністю коефіцієнта використання. За даними **рис. 2.3.10С**, реактори з вищим рівнем споживання частіше використовуються для приготування їжі.

Цей підхід дозволяє виявляти системи з невикористаним потенціалом. Графіки за часом використання можуть допомогти користувачам краще розуміти можливості своїх установок. Якщо програми моніторингу впровадjuватимуть такі техніки, вони зможуть своєчасно виявляти недовантажені установки та підтримувати користувачів для покращення експлуатації.

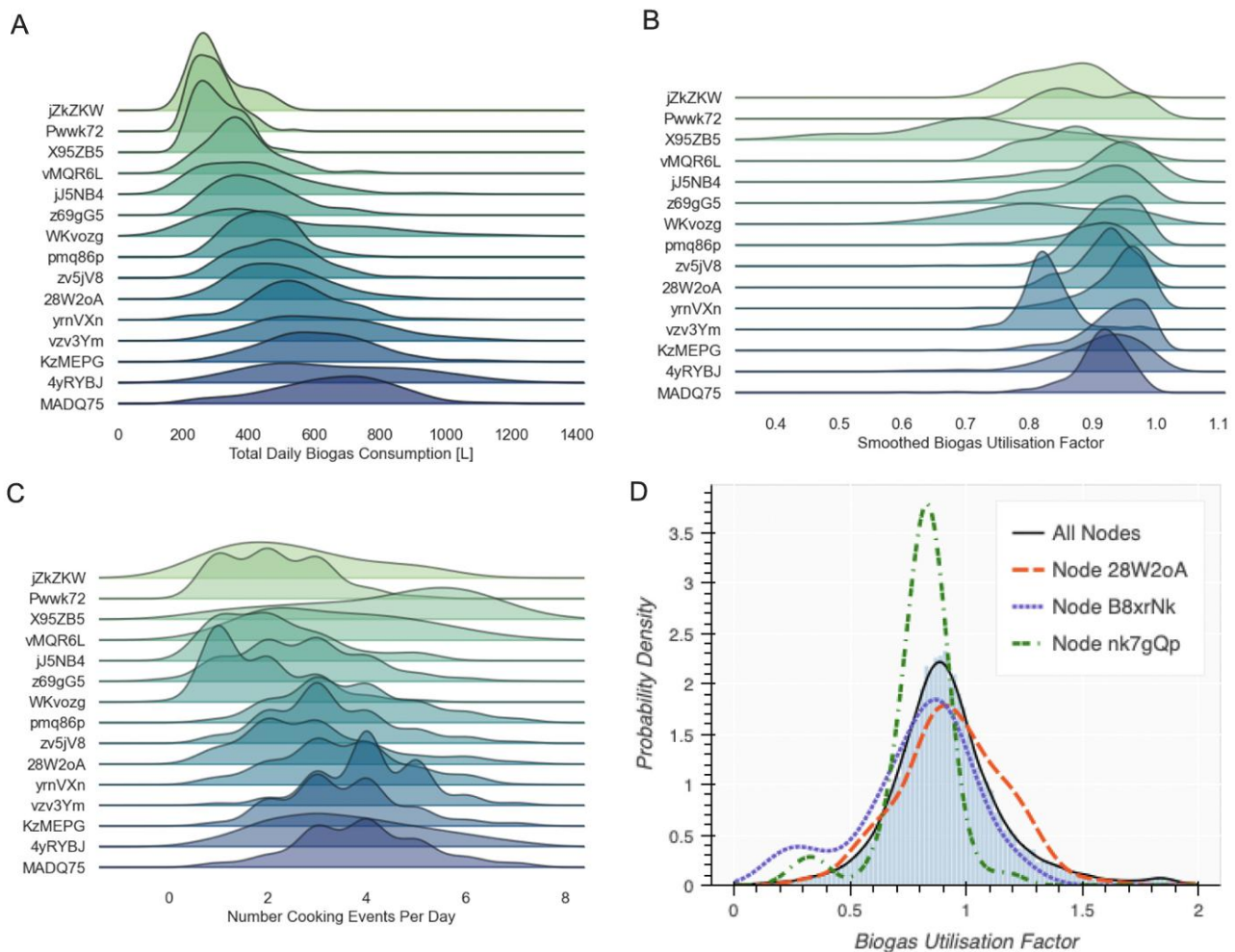


Рис. 2.3.10. Діаграми ліній гребня, що порівнюють статистичний розподіл ознак для дигесторів ємністю 6 м³ в Уганді. (А) Загальне добове споживання біогазу, виміряне за допомогою каліброваного витратоміра InclusiveEnergy, впорядкованого за медіанним значенням (В) Ті ж дигестори, що й в А, але розподіл згладженого коефіцієнта використання біогазу. (С) Розподіл кількості процесів приготування їжі на день для одного й того ж набору дигесторів. (D) Розподіл коефіцієнта використання біогазу для трьох дигесторів.

Візуалізація повного розподілу параметрів використання для кількох систем (а не лише середніх значень) надає глибше розуміння поведінки користувачів. У фінальній частині розглянуто використання кластерного аналізу методом *k*-середніх, що дозволяє ідентифікувати установки, які потенційно потребують уваги та підтримки.

Кластеризація для виявлення поведінкових закономірностей.

Щоб проілюструвати метод кластеризації, описаний у розділі про коефіцієнт використання біогазу (BUF), було досліджено взаємозв'язок між кількістю опадів і середньою тривалістю приготування їжі на прикладі одного біогазового реактора. За допомогою ковзного 7-денного вікна та алгоритму *k*-середніх (*k*=2) кластеризовано ознаки «сумарна кількість опадів» та «середня тривалість приготування їжі». Для уникнення викривлень результатів через різні

масштаби ознак дані були стандартизовані за допомогою стійкого масштабування..

Для оцінки статистичної значущості відмінностей між ідентифікованими кластерами було застосовано тест Манна-Вітні. Аналіз показав статистично значущі відмінності як за кількістю опадів (р-значення: $1.02e-46$), так і за тривалістю приготування їжі (р-значення: $8.21e-13$). Це свідчить про наявність поведінкових змін залежно від погодних умов: зазвичай тривалість приготування їжі збільшується в періоди з високою кількістю опадів (кластер 1) і скорочується в посушливі періоди.

Таким чином, кластеризація демонструє свою ефективність у виявленні прихованих закономірностей у часових рядах, таких як залежність між погодними умовами та поведінкою користувачів. Такий підхід дає змогу кількісно підтвердити якісні спостереження щодо впливу доступності води на експлуатацію біогазових установок упродовж року. Створення мереж моніторингу реакторів може допомогти біогазовим програмам краще розуміти поведінку користувачів у різних умовах, розробляти цілеспрямовані заходи підтримки й забезпечити стабільну роботу установок.

Виявлення аномалій.

Алгоритм виявлення аномалій, що ґрунтується на кластеризації k-середніх (описаний у секції BUF), було застосовано до двох основних операційних показників: максимального тиску в системі та споживання біогазу. Використовуючи дані з реакторів, де вже були зафіксовані збої, алгоритм класифікував спостереження на три стани: «нормальний рівень», «низькі значення» та «аномалії». Ці категорії відповідають різним режимам роботи, що дає змогу виявляти відхилення від типових характеристик функціонування установки.

На **рис. 2.3.7** показано, як багатовимірний аналіз дозволяє виявити як поступове зниження ефективності, так і раптові зміни в роботі системи. Наприклад, на **рис. 2.3.7В** алгоритм виявив тривалий період знижених показників, який передував остаточному виходу системи з ладу. Можливість раннього виявлення таких ситуацій дозволила б своєчасно провести профілактичне обслуговування.

Незважаючи на те, що алгоритм MinClusterDetector аналізує кожен пункт як окреме спостереження (що обмежує його здатність виявляти часові закономірності), він залишається ефективним для виявлення суттєвих відхилень, що потребують втручання. Такий підхід забезпечує програмам доступ до автоматизованих інструментів моніторингу та раннього виявлення проблем, дозволяючи вчасно реагувати на ознаки деградації системи та підвищувати якість обслуговування користувачів.

Надалі варто дослідити застосування інших алгоритмів аналізу часових рядів, які краще враховують сезонність і часову залежність. Це дозволить підвищити точність виявлення аномалій у багатовимірних часових даних та отримати глибші інсайти щодо тенденцій і сезонних коливань, що підвищить

ефективність систем раннього попередження щодо функціонування біогазових установок.

2.3.4. Висновки та рекомендації

У дослідженні продемонстровано цінність дистанційного моніторингу тиску в газовій камері та обсягів споживання біогазу для отримання уявлення про поведінку користувачів і можливість порівняльної оцінки ефективності різних біогазових установок. Основні висновки такі:

- Аналіз даних про тиск і витрату газу, а також виділення й кластеризація добових характеристик дозволяють отримати детальні відомості про кулінарні звички домогосподарств, щоденні режими та сезонні коливання. У поєднанні з метеоданими цей підхід дозволяє кількісно оцінити вплив таких факторів, як наявність води, на практики завантаження сировини до установок. Такий підхід надає об'єктивні й безперервні вимірювання, що доповнюють результати якісних досліджень.
- Представлений у дослідженні коефіцієнт використання біогазу (Biogas Utilisation Factor, BUF) є новим показником для оцінки ефективності роботи біогазових установок. Він дозволяє проводити порівняння між споживанням і генерацією газу для установок різного обсягу та типу, виявляючи недовантажені системи. Якщо середнє значення BUF нижче одиниці, частина метану випускається в атмосферу, що робить цей показник особливо корисним у рамках програм компенсації викидів вуглецю.
- Розроблена методика візуалізації часу використання дозволяє краще розуміти щоденні кулінарні звички та поведінку користувачів. У поєднанні з аналізом BUF, вона забезпечує біогазові програми дієвим інструментом для виявлення технічних і поведінкових чинників, що впливають на ефективність роботи установок.
- Методи виявлення аномалій і кластеризації, запозичені з практики моніторингу використання твердопаливних печей, ефективно ідентифікують моделі споживання та відхилення в роботі. Це дозволяє оперативно повідомляти про проблеми та швидше їх усувати, запобігаючи серйозним збоям. Автоматизація цих процесів сприятиме підвищенню якості обслуговування клієнтів і дозволить впроваджувати адресні інтервенції.
- Дослідження демонструє, що навіть відносно прості вимірювання можуть забезпечити багаті за змістом дані про технічну ефективність і поведінку користувачів за умови застосування відповідної аналітики. Це суттєвий крок уперед у порівнянні з традиційними підходами, які переважно базувались на періодичних опитуваннях або фокусувались лише на технічних параметрах.

Рекомендована література (біогазове виробництво)

- N.A.S. Tjutju, J. Ammenberg, A. Lindfors (2024) "Biogas potential studies: A review of their scope, approach, and relevance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 201, 114631, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114631>

- *Farooq Sher, Narcisa Smječanin, Harun Hrnjić, Amar Karadža, Rasim Omanović, Elma Šehović, Jasmina Sulejmanović (2024) "Emerging technologies for biogas production: A critical review on recent progress, challenges and future perspectives", Process Safety and Environmental Protection, Vol. 188, p. 834-859, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.138>.*
- *Seyed Saeid Hosseini, Joeri F.M. Denayer (2022) "Biogas upgrading by adsorption processes: Mathematical modeling, simulation and optimization approach – A review", Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 10, Iss. 3, 107483, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107483>.*
- *Giacomo Carraro, Karin Tonderski, Alex Enrich-Prast (2024) "Solid-liquid separation of digestate from biogas plants: A systematic review of the techniques' performance", Journal of Environmental Management, Vol. 356, 120585, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120585>*
- *Joel Chaney, Edward H. Owens, Benjamin L. Robinson, Mike J. Clifford (2025) "Digesting data: Improving the understanding of biogas use through remote sensing", Energy for Sustainable Development, Vol. 86, 101668, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101668>.*

Питання для самоперевірки (біогазове виробництво)

- Чому біоенергетика вважається ключовою складовою переходу до відновлюваної енергетики?
- Які основні фактори впливають на потенціал виробництва біогазу у конкретному регіоні?
- Які головні технічні виклики все ще обмежують ефективність виробництва біогазу?
- У чому полягає принципова відмінність між процесами PSA, VPSA та TSA?
- Які математичні моделі використовуються для опису процесів адсорбції під час очищення біогазу?
- Як симуляційні методи допомагають у виборі оптимальних параметрів роботи системи?
- Які основні обмеження існують при моделюванні процесів адсорбції?
- Які основні методи використовуються для розділення твердої та рідкої фаз дигестату? Які переваги має розділення фаз дигестату для подальшого використання продуктів?
- Як розділення дигестату може впливати на економічну ефективність біогазової установки?
- Які типи даних дистанційного зондування можуть бути корисними для дослідження використання біогазу?
- Як інтеграція геоінформаційних систем (ГІС) і супутникових даних допомагає у плануванні біоенергетичних проєктів?
- Чим може бути корисний аналіз часових рядів дистанційних даних у біоенергетиці?

3. СВІТОВИЙ ДОСВІД АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ВИРОБНИЦТВ У ПРОМИСЛОВОМУ ПТАХІВНИЦТВІ.

3.1 РОБОТОТЕХНІКА ДЛЯ ПТАХІВНИЦТВА: ВИКЛИКИ ТА МОЖЛИВОСТІ

Сучасне птахівництво стикається з низкою серйозних викликів, серед яких – збереження здоров'я та добробуту тварин, управління мікрокліматом у пташниках, ефективна організація виробничих процесів, а також проблеми, спричинені людським фактором, зокрема ризику контамінації. З метою підвищення ефективності та зниження залежності від ручної праці, галузь поступово переходить до використання інтелектуальних систем керування, що базуються на автоматизації та роботизації.

Інтеграція «розумних» технологій у птахівництві відкриває нові можливості для оперативного моніторингу стану тварин і виробничих процесів, забезпечуючи прийняття обґрунтованих рішень на основі аналізу великих обсягів даних. Проте впровадження таких рішень також супроводжується новими викликами, зокрема технічними, етичними й організаційними.

Серед доступних технологічних інструментів особливу увагу привертають роботизовані системи. Вони виконують низку функцій, пов'язаних із фенотипуванням, моніторингом, менеджментом і контролем параметрів середовища. Сучасні робототехнічні рішення в птахівництві дозволяють автоматично збирати яйця з підлоги, прибирати загиблих птахів, а також виконувати інші рутинні завдання, що знижує потребу в людській праці та оптимізує виробничі процеси.

Разом з тим, питання впливу таких роботів, що мають прямий контакт із тваринами, на їхнє здоров'я та поведінку ще недостатньо досліджене. Наразі розвивається новий напрям — вивчення колективної й соціальної поведінки тварин через взаємодію з роботами. Зокрема, увагу привертає феномен так званого «філіального імпринтингу» — швидкого формування прив'язаності у молодих тварин до об'єкта, який вони сприймають як батьківську фігуру. Завдяки цьому роботи можуть використовуватись як інструмент для стандартизованого вивчення соціальної поведінки у контрольованих умовах, що відкриває нові горизонти для етологічних досліджень.

Сьогодні спостерігається зростання інтересу до застосування роботів у птахівництві. Багато досліджень присвячено інтеграції автоматизації, сенсорних технологій, штучного інтелекту, аналізу великих даних, інтернету речей та логістичних рішень у цій галузі. Проте тематика соціальної взаємодії між роботами та тваринами, а також її вплив на добробут птиці та зміну поведінки поки що залишається малодослідженою.

У цьому розділі розглядається стан і перспективи використання роботів у птахівництві, особлива увага приділяється взаємодії «робот–тварина» та її застосуванню для аналізу соціальної поведінки. Також визначено основні напрямки подальших досліджень, спрямовані на покращення умов утримання птиці та забезпечення їхнього здоров'я. У подальших підрозділах буде

розглянуто актуальні виклики (розділ 2), застосування роботів для виконання конкретних виробничих функцій (розділ 3), а також аспекти взаємодії між роботами й тваринами (розділ 4). Обговорення буде зосереджене на існуючих обмеженнях робототехнічних рішень у птахівництві та напрямках їх подальшого вдосконалення.

3.1.2. Актуальні виклики у птахівництві

Попри досягнення в інтенсивності виробництва, зокрема в зростанні темпів приросту бройлерів та підвищенні продуктивності несучок, галузь птахівництва стикається з низкою проблем. Серед них — спалахи хвороб, нові вимоги до добробуту тварин, вплив навколишнього середовища, а також виклики, зумовлені людським фактором. У цьому розділі викладено чотири основні напрями сучасних викликів у птахівництві: здоров'я та добробут тварин, управління пташниками, виробництво й проблеми, спричинені діяльністю людини.

3.1.2.1. Здоров'я та добробут тварин

Підтримання здоров'я птиці має критичне значення для функціонування господарств. Хвороби домашньої птиці становлять серйозну загрозу, оскільки деякі з них можуть перерости у пандемії з глобальними наслідками. Тому необхідне постійне моніторинг стану поголів'я — як для профілактики, так і для своєчасної діагностики та лікування. Сучасні роботизовані рішення дозволяють виявляти ознаки захворювань і контролювати рівень смертності (див. підрозділ 3.1.3.2). Деякі роботи також сприяють підвищенню рухової активності тварин, що позитивно впливає на їхнє здоров'я (див. підрозділ 3.1.3.5).

Паралельно постає завдання забезпечення добробуту тварин. Йдеться не лише про задоволення базових фізіологічних потреб, а й про створення умов, які роблять життя тварини «вартим проживання». Це вимагає стандартизованих показників і чітких методів оцінювання. Добробут оцінюється за такими індикаторами: належне харчування, хороше здоров'я, відповідні умови утримання та можливість реалізувати природну поведінку. Зокрема, для птиці важливим є урахування її соціальної поведінки. У цьому контексті роботи, про які йдеться у підрозділі 3.1.4.2, розроблені з метою спостереження за добробутом птиці та стимулювання її соціальної взаємодії.

3.1.2.2. Управління пташниками

Попри відносно низький рівень викидів парникових газів та помірне використання води, птахівництво все ж чинить певний негативний вплив на довкілля. Основні екологічні ризики — це викиди аміаку, витоки нітратів, енергоспоживання, організація утримання та управління послідом. Зменшення цього впливу можливе завдяки ефективному моніторингу та оптимізації управління пташниками, зокрема впровадженню нових технологій з утилізації відходів.

Важливим завданням є підтримання належного мікроклімату в приміщеннях. Температура, вологість, вентиляція, концентрація газів та освітлення безпосередньо впливають на здоров'я та продуктивність птиці. Роботи, оснащені відповідними сенсорами, можуть автоматично відстежувати ці параметри (див. підрозділ 3.1.3.1).

Ще один аспект — управління підстилкою. Забруднення кормом, фекаліями або підвищена вологість можуть спричинити зростання бактеріального навантаження та підвищення рівня аміаку, що негативно впливає на здоров'я тварин. Отже, підстилка має постійно контролюватися та утримуватись у належному стані протягом усього виробничого циклу. Роботизовані рішення щодо догляду за підстилкою розглядаються у підрозділі 3.4.

3.1.2.3. Виробництво

Виробничі виклики у птахівництві полягають у необхідності забезпечити харчову безпеку при збереженні низьких собівартостей. Основні витрати пов'язані з кормами, обслуговуванням та обладнанням, однак втрати продукції також суттєво впливають на рентабельність господарств. Наприклад, виявлення малопродуктивних несучок та моніторинг їхньої поведінки можуть допомогти зменшити витрати.

У системах вільного виходу птиці, де кури мають доступ до відкритого простору та можуть проявляти природну поведінку, можуть виникати проблеми з яйцями, знесеними на підлогу. Такі яйця важко зібрати, а затримка із збором збільшує ризик псування та мікробного забруднення, що шкодить якості продукції. Роботизовані системи можуть ефективно автоматизувати процес збору яєць, зменшити втрати й підвищити стандарти безпеки харчових продуктів (див. підрозділ 3.1.3.3).

3.1.2.4. Людський фактор

До щоденних обов'язків працівників птахоферм належать догляд за тваринами, контроль стану здоров'я, утримання в належному стані пташників, а також збір і облік продукції. Проте зі збільшенням масштабів господарств і переходом до більш складних систем вирощування ручне спостереження стало трудомістким, дорогим і суб'єктивним. Впровадження автоматизованих систем моніторингу дозволяє зменшити людське навантаження й підвищити точність прийняття рішень.

Крім того, часта присутність людей у пташниках може викликати у птиці стрес і навіть сприяти перенесенню патогенів. Це створює загрозу як для здоров'я тварин, так і для безпеки працівників. Функціональні можливості роботизованих систем, розглянутих у розділі 3.1.3, відкривають шлях до подолання цих проблем. А в підрозділі 3.1.4.1 буде представлено порівняння між взаємодією «людина–тварина» та «робот–тварина», що дозволить оцінити переваги роботів у покращенні добробуту тварин та зниженні рівня стресу.

3.1.3.1. Моніторинг навколишнього середовища

Для покращення управління у птахівництві як у напрямку вирощування бройлерів, так і несучок, необхідно здійснювати постійний моніторинг як приміщень, так і самих тварин. Екологічний моніторинг забезпечує важливу інформацію щодо якості повітря на фермі, температури, вологості, швидкості руху повітря та рівня вмісту вуглекислого газу, що є критично важливим для підтримки здоров'я та добробуту птиці. Отримання даних у реальному часі сприяє прийняттю обґрунтованих рішень щодо підтримання сприятливих умов утримання, своєчасного виявлення спалахів захворювань, а також підвищенню ефективності виробництва.

У зв'язку з цим роботи, оснащені сенсорами, камерами та іншими пристроями, можуть суттєво сприяти розвитку галузі птахівництва. Деякі з комерційно доступних роботів здатні здійснювати моніторинг та реєстрацію екологічних параметрів, надаючи цінну інформацію для птахівників.

Наприклад, раніше відомий як ChickenBoy (Faromatics, Іспанія), — це автономний робот, що переміщується під стелею, приблизно за пів метра над птицею. Він оснащений тепловими і світловими камерами, сенсорами температури, вологості, швидкості повітря, концентрації CO₂, аміаку, а також освітленості й шуму. Лазерний вказівник стимулює рух птахів. Цей робот може контролювати розміщення птиці, виявляти хворих і загиблих особин, визначати вологі ділянки на підстилці або біля поїлок, а також проводити ранню діагностику кишкових захворювань за станом посліду. Фотозображення дають змогу аналізувати стан ніг. Повідомлення з результатами спостережень надсилаються фермерам через SMS або електронну пошту.

Інший приклад — Poultry Patrol, багатофункціональний робот, здатний працювати в автономному та дистанційно керованому режимах. Завдяки вбудованим камерам він забезпечує відеоспостереження за птахофермою, ідентифікуючи хворих або загиблих птахів та надсилаючи попередження птахівникам.

Розроблений Лю з колегами мобільний робот з інтелектуальною системою моніторингу птахів передає зібрані дані про навколишнє середовище та перешкоди до центрального блоку, де здійснюється обробка, зберігання та керування. Octopus XO — багатофункціональний робот, що вимірює температуру, вологість, CO₂, аміак, рівень шуму та інтенсивність освітлення. RoboChick, створений Королівським ветеринарним коледжем, призначений для огляду пташників і оснащений сенсорами температури, вологості, CO₂ та швидкості повітряного потоку.

Більшість подібних систем розроблені комерційними компаніями, які часто не публікують свої дані, що обмежує прозорість і відтворюваність результатів. Крім того, наукові дослідження щодо цих роботів у птахівництві залишаються обмеженими. Щоб оцінити ефективність і надійність таких систем, необхідні експериментальні дослідження з подальшою публікацією результатів.

Це сприятиме поширенню знань і допоможе науковцям та фахівцям галузі ухвалювати зважені рішення.

Роботи, які пройшли експериментальні випробування та довели здатність забезпечувати простежуваність умов утримання птахів, мають потенціал для широкого впровадження в галузі. Подальші дослідження і поширення результатів сприятимуть розширенню використання роботизованих технологій у сучасному птахівництві.

3.1.3.2. Контроль захворювань

Патогенні інфекції є однією з найсерйозніших проблем у птахівництві, оскільки можуть швидко поширюватися всередині пташника. Одним із підходів до їх подолання є впровадження роботизованих систем для оперативного виявлення хворих особин і видалення мертвих птахів. Оснащення роботів сенсорами дає змогу створювати системи раннього попередження, що дозволяє контролювати стан здоров'я поголів'я та запобігати поширенню інфекцій.

Деякі роботи розроблені для моніторингу температури тіла та рухової активності птахів у кліткових системах з використанням тепловізійних камер. Наприклад, роботи здатні розпізнавати птахів з аномальною температурою тіла або тих, що не рухаються, що вказує на можливе захворювання чи смерть.

Інші системи роботів створені з метою виявлення та видалення мертвих особин, працюючи як у дистанційному режимі, так і в автономному. Такі системи зазвичай оснащені маніпуляторами, конвеєрними стрічками, зонами зберігання та механізмами збору. Вони можуть розпізнавати мертвих птахів за допомогою алгоритмів глибинного навчання, досягаючи високої точності. Проте існує проблема: мертві птахи можуть мати схожий вигляд із живими, які сидять або лежать, що ускладнює точне розпізнавання.

Щоб покращити точність виявлення, необхідно збільшити обсяг навчальних даних і зменшити кількість помилок у класифікації. У деяких моделях також використовується інфрачервоне зображення для розпізнавання мертвих особин. Розроблені системи демонструють високу ефективність, хоча результати можуть варіюватися залежно від умов освітлення або розміщення птахів у багатоярусних клітках.

Окрім проєкти передбачають використання двох роботів: один виконує пошук у просторі пташника, інший – підбирає і видаляє виявлених мертвих птахів. Серед механізмів підбору використовуються обертові лопати, маніпулятори з захоплювачами, а також вбудовані камери, які дозволяють працювати з різною інтенсивністю освітлення.

Проте більшість роботів поки що не мають можливості захоплювати і ізолювати хворих птахів. Окрім того, системи збору мертвих особин частіше використовуються в умовах вільного вигулу, а не в закритих приміщеннях. Різноманітні перешкоди, як-от годівниці та поїлки, обмежують рухливість роботів. Тому важливо вдосконалити гнучкість систем: запровадити м'які маніпулятори, які легко адаптуються до форми об'єкта, а також тактильні

сенсори, які допоможуть ідентифікувати об'єкти при взаємодії в непередбачуваних умовах.

Попри значні досягнення, ефективність таких систем у реальних умовах птахоферм потребує подальшого вдосконалення.

3.1.3.3. Збирання яєць із підлоги

Перехід від кліткових до безкліткових систем утримання спрямований на покращення добробуту курей-несучок. Такі системи забезпечують птахам більшу свободу руху, можливість розправити крила, здійснювати природну поведінку, включаючи купання в пилу та гніздування. Однак однією з проблем у безкліткових системах є відкладання яєць поза гніздами – наприклад, у кутах пташника або в темних зонах. Такі "підлогові яйця" знижують ефективність виробництва.

Для вирішення цієї проблеми були розроблені автоматичні роботи для збирання яєць (рис. 3.1.1.). Їхнє застосування також допомагає зменшити вплив людського фактора й потребу в ручній праці.

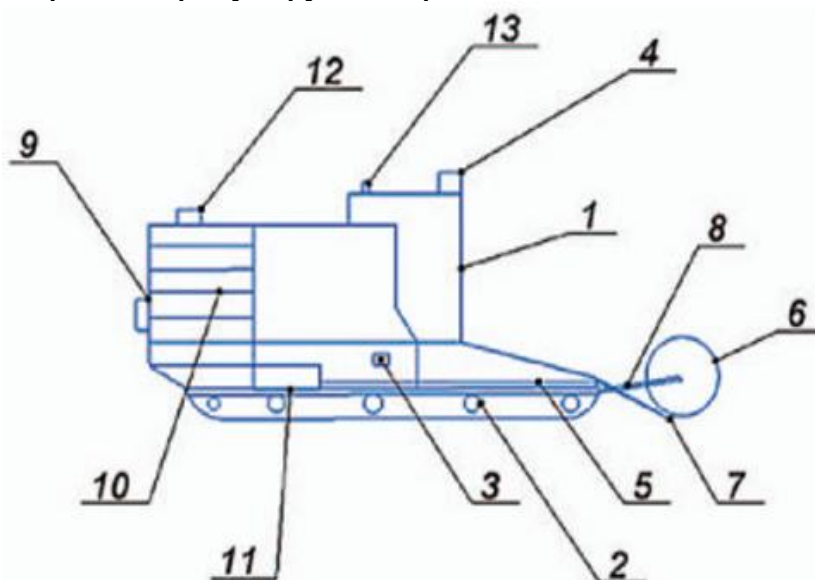


Рис. 3.1.1 Роботизована система збору яєць

Принцип роботи: Валик подачі (6) подає яйця до пальців-захоплювачів (7), які спрямовують їх на перфорований транспортер (5). Звідти яйця транспортуються до касети для зберігання (10), розміщеної в бункері (9). Датчик тиску (11), вбудований у бункер, визначає вагу яєць, що дає змогу контролювати рівень заповнення касети. Коли касета повністю заповнена, сигнал надходить до блоку управління (3), який ініціює її заміну: використана касета переміщується до нижньої частини бункера, а на її місце встановлюється нова. Після заповнення всіх касет блок управління активує гусеничне шасі (2), що транспортує систему до розвантажувального цеху для вивантаження касет і початку нового циклу збору. Камера відеоспостереження (12) дозволяє здійснювати ручний контроль при потребі, а сигнальна лампа (13) інформує про поточний робочий стан системи .

Один із прикладів серійних апаратів – автономний робот, обладнаний спіральною пружиною для збору яєць. Така система показала високу ефективність, збираючи понад 95% яєць. Проте в досліджах також були зафіксовані випадки невдалого збору, зокрема через складну навігацію або перешкоди в середовищі.

Інші роботи використовують комп'ютерне зору для розпізнавання білих і коричневих яєць, після чого наближаються до них і забирають у спеціальні камери зберігання. В експериментах такі роботи збирали від 60% до 88% яєць у різних умовах. Для ефективної роботи їм потрібна рівна поверхня без сторонніх предметів, схожих на яйця.

Також були створені системи зі спеціальними маніпуляторами або вакуумними захоплювачами, які показують успішність збору на рівні понад 90%. Деякі моделі можуть ще й класифікувати яйця за розміром і формою.

Загалом роботи для збирання яєць стикаються з такими основними викликами:

- Навігація в пташнику: локалізація, прокладання маршрутів та уникнення перешкод.
- Виявлення яєць у складних умовах.
- Збирання яєць без пошкоджень.
- Зберігання і, за можливості, сортування яєць за параметрами.

Ці системи потребують подальших вдосконалень для успішної інтеграції у промислове птахівництво.

3.1.3.4. Дезінфекція та управління підстилкою

Підлога пташника може забруднюватися послідом та залишками корму, що призводить до забруднення повітря та розвитку патогенів. Для збереження здоров'я птиці необхідно регулярно очищати та дезінфікувати приміщення. Роботи можуть ефективно застосовуватись для дезінфекції та розумного управління виробництвом у птахівничих господарствах.

Належне управління підстилкою є ключовим елементом у птахівництві. Регулярне розпушування підстилки сприяє її аерації, перешкоджає процесу бродіння та знижує вологість. Роботи, розроблені для розпушування підстилки, можуть вирішити відповідні проблеми, підтримуючи здоров'я птиці (**рис. 3.1.2**).

Один із прикладів — робот для дезінфекції, який складається з платформи, транспортного засобу, сенсорів, розпилювального механізму та контролера. Він може працювати як автономно, так і під дистанційним керуванням. Навігація здійснюється за допомогою встановлених магнітів і RFID-міток, що дозволяє роботу пересуватися по заданому маршруту. Він забезпечує необхідну концентрацію дезінфікуючих речовин у всіх частинах пташника для ефективного знищення патогенів.

Інший приклад — мобільна платформа, що використовується для моніторингу та санітарної обробки підстилки. Вона оснащена сенсорами газу та ґрунту, які вимірюють температуру, вологість, рН та рівень аміаку, дозволяючи

прогнозувати розвиток захворювань. Робот Ostorus XO автономно пересувається пташником, розпушує підстилку, зменшує утворення аміаку та проводить дезінфекцію шляхом розпилення спеціальних розчинів.

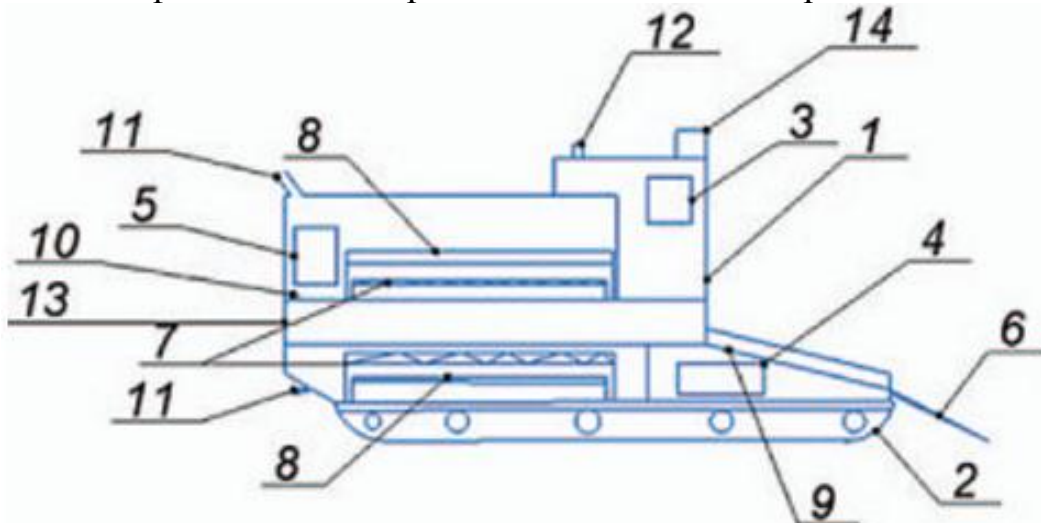


Рис. 3.1.2 Робот-ворушник підстилкового матеріалу

Принцип дії: Після запуску блок управління (3) подає сигнал на електродвигуни (4, 5), активується відеокамера (14), і робот починає рух. Підстилка підбирається лопаткою (6) та подається на перфорований транспортер (9). Нагрівальні елементи (7) та вентилятори (8), розташовані над і під стрічкою, обробляють матеріал. Температура контролюється датчиком (10), а сигнальна лампа (12) вказує на критичні стани. Оброблений матеріал вивантажується через отвір (13). Повітря надходить через повітроводи (11), забезпечуючи циркуляцію в системі.

Робот Spoutnic-NAV розпушує підстилку завдяки вилам, встановленим на задній частині конструкції. Аналогічно, робот Poultry Patrol також розпушує підстилку під час руху, сприяючи вентиляції. Birds Eye Robotics має колеса зі шипами, що допомагають краще захоплювати поверхню підстилки, перевертаючи її під час руху.

У системах вирощування на підлозі, окрім регулярного розпушування і дезінфекції, важливим підходом є додавання свіжої підстилки поверх існуючої. Наприклад, FirstPellets розробили автоматизовану систему розсипання підстилки, яка монтується до стелі й рівномірно розподіляє підстилку за допомогою обертового диска. Інші приклади — “PoultryMate” та “Sentinel”, які також використовують стельові платформи для розподілу підстилки, а останній ще й оснащений інфрачервоною камерою та сенсорами для виявлення вологих ділянок.

Для ефективної роботи в умовах вільного утримання птиці ці роботи мають бути мобільними, точними у навігації та не створювати небезпеки для тварин. Також існує виклик у точному визначенні ділянок, які потребують дезінфекції, та кількості речовини, що має бути розпилена.

3.1.3.5. Стимулювання активності птиці

Фізична активність важлива для підтримання здоров'я та добробуту птиці. Тривале малорухливе перебування негативно впливає на її стан. У сучасному виробництві використовують швидкорослі породи, які, зазвичай, менш активні — більше сидять, більше їдять і менше рухаються. Натомість активніші птахи мають кращу чистоту пір'я, нижчий рівень ураження шкіри та краще здоров'я ніг.

Дослідження показали, що роботи можуть ефективно стимулювати рух бройлерів, що покращує якість їхніх кісток. Основні підходи до стимулювання активності — це використання мобільних наземних роботів та лазерних вказівників.

Мобільні роботи, які пересуваються в межах пташника, провокують рух тварин довкола. Також деякі роботи використовують лазерні промені, які спрямовують на підлогу, змушуючи птахів рухатися за ними. Наприклад, роботи T-Moov і Sproutnic NAV не лише підвищують активність птиці, а й зменшують проблему яєць, знесених на підлогу. Активність птахів призвела до більшої споживаності корму, збільшення ваги на 300 г на особину та зниження потреби в антибіотиках.

Інше дослідження показало, що рухливість бройлерів змінюється протягом усього циклу вирощування в зоні дії робота. Роботи, окрім збору екологічних даних, ефективно стимулювали активність та дослідницьку поведінку у птахів.

Наприклад, робот Octopus XO одночасно розпушує підстилку та використовує лазери для стимуляції активності. Scout також заявляє про здатність підвищувати активність тварин. Інші роботи, як RoboChick, можуть сприяти руху птахів завдяки своїй присутності.

Попри ці переваги, наземні роботи мають певні труднощі, зокрема в навігації та уникненні перешкод. Для успішного використання роботів у птахівництві ці аспекти потребують доопрацювання. Також потрібні додаткові дослідження для оцінки ефективності існуючих комерційних роботів.

Загалом, використання роботів для стимулювання активності птиці є перспективним напрямом, що потребує подальших досліджень і вдосконалення технологій.

3.1.4. Роботи для соціальної взаємодії

3.1.4.1. Оцінка взаємодії між роботами й тваринами

У цьому розділі розглядаються дослідження, пов'язані з впливом взаємодії між роботами та тваринами на їхнє благополуччя та здоров'я. Було показано, що оцінку продуктивності, здоров'я тварин та рівня їхнього благополуччя можна здійснювати за допомогою камер і сенсорів, встановлених на роботах, які моніторять птахоферми. Проте окрему увагу слід приділяти роботам, які безпосередньо контактують із птахами, і їхньому впливу на стан тварин.

Взаємодія роботів з птахами може мати позитивний ефект, зокрема шляхом підвищення рівня активності птахів. Це сприяє покращенню стану лап та збереженню чистоти оперення завдяки зменшенню часу перебування на

підлозі. Однак існує занепокоєння щодо можливих стресів, які можуть виникати внаслідок таких контактів. Рухомі наземні роботи можуть ненавмисно штовхати птахів, травмувати їх або лякати.

Страх є природною реакцією на загрозу і виконує захисну функцію. Проте надмірний страх може призводити до панічних реакцій, скупчень, задушення, порушень руху та травм, таких як ушкодження кіля — типові проблеми благополуччя в системах без кліток. Поведінкові дослідження, засновані на вивченні природного репертуару видів, допомагають виявити ознаки страху або адаптації до зовнішніх подразників.

Такі дослідження охоплюють поведінкові маркери (уникання, дослідницька поведінка, активність, паніка), фізіологічні показники (рівень кортикостерону, стан оперення, серцевий ритм, кульгавість, пошкодження кісток) і додаткові методи вимірювання (наприклад, вокалізацію). Поведінка уникання вважається проявом страху. Натомість дослідження середовища свідчить про зменшення страху та здатність до адаптації. Спостереження за цими поведінками дозволяє оцінити загальний стан тварин.

Випробування на дистанцію уникання використовуються для виявлення страху та дослідницької поведінки у процесі взаємодії з роботами. Декілька досліджень оцінили поведінку уникання у птахів при взаємодії з роботами. Наприклад, у дослідженні, де порівнювали реакцію птахів на людину та мобільного робота в умовах, наближених до промислових, було встановлено, що робот може безпечно працювати серед курчат. Поведінка птахів оцінювалася за допомогою камер, встановлених на маршруті, яким тричі на день рухався робот. Спостерігалось підвищення активності курчат під час роботи робота, хоча менш виражене, ніж у присутності людини. Реакції наляканості були слабкими. Було зроблено висновок, що ранній контакт з роботами сприяє звиканню та зниженню страху. Також було виявлено, що курчата до 9 днів не демонструють реакцій на переляк, що вказує на важливість раннього знайомства з роботами.

Інше дослідження вивчало дистанцію уникання у курей-несучок та бройлерів різного віку при взаємодії з роботом. Дистанція уникання зменшувалася з віком у обох груп. У цьому ж дослідженні також порівнювали взаємодію птахів з роботами та з людьми. Виявилось, що дистанція уникання до людей була меншою, ніж до роботів, і це може бути пов'язано з тим, що птахи щодня контактували з людьми, а з роботом — лише в день тесту. Дослідники припустили, що звук і швидкість робота могли впливати на поведінку птахів, тому ці параметри варто оптимізувати.

Інше дослідження вивчало, як курчата реагують на роботи з різною швидкістю руху. При повільному русі птахи мали меншу дистанцію уникання, але відбувалося більше зіткнень. При більшій швидкості дистанція уникання збільшувалася, але кількість зіткнень зменшувалася. Це свідчить про зворотну залежність між швидкістю робота та частотою зіткнень.

В іншому дослідженні оцінювався вплив наземного робота, призначеного для зменшення кількості підлогових яєць, на виробничі показники, споживання корму, смертність, рівень стресу, якість кісток і поведінку. Було сформовано три

групи: без робота, з впливом робота протягом 1 тижня та протягом 2 тижнів. Дослідження тривало 10 тижнів і показало, що робот не викликав стресу і не вплинув на продуктивність. Хоча активність птахів зросла, не було значних змін у якості кісток чи поведінці. Автори зазначили, що одного-двох тижнів може бути недостатньо для оцінки впливу на довгострокові показники.

В іншому дослідженні було проаналізовано вплив роботів на виробничі показники, ходу птахів, стан лап, чистоту оперення і загальну активність. Робот, керований дистанційно, сприяв зростанню активності бройлерів без негативного впливу на продуктивність.

Загалом, ранній початок взаємодії з роботами сприяє зниженню страху та пришвидшенню адаптації птахів. Проте поки що недостатньо відомо про те, як на реакції птахів впливають їхній вік та фізичні характеристики роботів (колір, розмір, звук, швидкість руху). Також необхідні дослідження щодо дизайну роботів, щоб уникнути травм у разі фізичного контакту з тваринами

3.1.4.2. Соціальні взаємодії

У промисловому птахівництві для вирощування пташенят використовуються високопродуктивні інкубатори. Проте такі пташенята з самого початку позбавлені контакту з квочкою, що позбавляє їх природних стимулів, важливих для формування поведінки та соціального навчання. У цьому розділі розглядається взаємодія між куркою та пташенятами для кращого розуміння процесу навчання в умовах вирощування з квочкою, а також можливості розробки роботизованих систем для стимулювання соціального навчання у разі відсутності матері.

У природних умовах курчата навчаються у квочки моделям поведінки, харчовим звичкам, режимам відпочинку та перевагам у кормі. Дослідження показали, що пташенята, вирощені з квочкою, демонструють синхронізацію активності й відпочинку: менше стоять, більше харчуються та рідше використовують сідала, ніж пташенята без квочки. Водночас відсутність матері провокує страх, пір'якування, паніку та травматизм у пташенят.

Пір'якування — це серйозна проблема добробуту у птахівництві, коли птахи починають дзьобати, висмикувати або скубти пір'я інших птахів у зграї. Якщо не вжити заходів, це може призвести до пошкодження оперення, травм шкіри й навіть канібалізму. Одним із можливих рішень є впровадження соціального навчання.

Механізми соціального навчання базуються на феномені філіального імпринтингу — швидкого навчального процесу, що дозволяє тваринам з перших днів життя впізнавати об'єкти, з якими вони стикаються, і формувати до них прихильність. Прихильність проявляється в поведінці слідування за цим об'єктом або сигналах тривоги при розлуці.

Курчата є чудовою моделлю для вивчення спонтанної соціальної взаємодії, зокрема поведінки, зумовленої імпринтингом. У природі це дозволяє пташенятам впізнавати квочку, але у разі її відсутності вони легко імпринтують навіть на штучні, не схожі на живі, об'єкти. Це відкриває перспективу розробки

роботів для соціальної взаємодії з пташенятами. Дослідження ранніх схильностей показали, що пташенята надають перевагу об'єктам з простими характеристиками: рух вгору, обличчеподібні візерунки, кольорові (особливо червоні й сині) та рухомі предмети. Значну роль у процесі імпринтингу відіграють також звукові сигнали.

Мета робототехнічних досліджень у цій сфері — покращення соціальної поведінки шляхом впровадження роботів як партнерів для навчання та розвитку пташенят. Це новаторський підхід до вивчення поведінки тварин, спрямований на створення роботів, які здатні формувати позитивну соціальну поведінку через імпринтинг.

У лабораторних умовах вже проводилися дослідження взаємодії пташенят з роботами, що базувалися на механізмі імпринтингу. Наприклад, автономний мобільний робот PoulBot був розроблений для вивчення колективної поведінки курчат. Завдяки імпринтингу робот сприймався пташенятами як ватажок зграї, і така інтеграція була підтверджена експериментально. Інший приклад — RoboChick, який використовував миготливе світло та звукові сигнали для привернення уваги пташенят. Його взаємодія з пташенятами не викликала страху й виявилася ефективною для подальших досліджень.

У ще одному дослідженні пташенят перепелів поділили на групи з попереднім або без попереднього контакту з роботом. Виявилось, що ті, хто мав ранній досвід взаємодії з роботом, згодом демонстрували більш синхронну поведінку та частіше видавали тривожні звуки при розлуці з ним. У ще одному експерименті автономний робот використовувався для вивчення просторової поведінки перепелят і продемонстрував високу мотивацію тварин до взаємодії.

Беручи до уваги масштабне індустріальне розведення пташенят без квочок, результати лабораторних досліджень мають великий потенціал для впровадження у практику. Попри обмеженість наявних прикладів, із розвитком сенсорики, автономності та адаптивних можливостей роботів очікується їх широке застосування. Використання соціальних механізмів навчання, реалізованих через роботизовані системи, може суттєво покращити добробут тварин у промисловому птахівництві.

3.1.5. Поточні обмеження та перспективи подальших досліджень

У цьому розділі розглядаються загальні поточні обмеження та можливі напрями розвитку досліджень, пов'язаних із застосуванням роботів у птахівництві, з акцентом на їхні різні функції. У порівнянні з масштабами галузі, наукові дослідження, а також кількість відкритих чи комерційних роботизованих систем залишаються обмеженими. Для оцінки ефективності роботи таких роботів необхідно проводити експериментальні дослідження та ділитися даними щодо їх надійності, зважаючи на важливу соціально-економічну роль галузі птахівництва у світі.

Загалом, сучасні роботи в птахівництві обмежені у функціональності та адаптивності, оскільки більшість з них розроблені для виконання лише однієї конкретної задачі. Тому майбутні дослідження мають бути спрямовані на

розширення багатофункціональних можливостей шляхом інтеграції сенсорів і новітніх технологій, зокрема штучного інтелекту.

Наприклад, у завданнях збирання підлогових яєць або виявлення мертвих птахів роботи стикаються з низкою труднощів: обмежений доступ до різних ділянок приміщення, складнощі з виявленням і захопленням цілей через конструкцію пташника, рух птахів, зміну освітлення та наявність важкодоступних зон. Роботи, призначені для збору яєць, також повинні забезпечувати їхнє сортування, зберігання та уникати пошкоджень.

Для подолання цих труднощів роботи мають бути здатні ефективно працювати за різних умов середовища та в різних виробничих системах. Особливе значення має надійність зорового і тактильного сприйняття, гнучкість і безпечність рухів. Необхідна розробка алгоритмів для виявлення об'єктів, орієнтації в просторі, навігації, планування маршруту та управління. Хоча деякі роботи можуть працювати вручну або дистанційно, потреба в автономності залишається актуальною для зменшення навантаження на операторів. Зорово-тактильне сприйняття є особливо важливим для автономних систем, що взаємодіють із предметами.

Одна з головних проблем — уникнення перешкод під час пересування у пташнику. Непередбачувана поведінка птахів може ускладнювати виявлення статичних перешкод. Роботи мають не лише враховувати об'єкти довкілля, але й маневрувати серед рухомих птахів. Це потребує високої точності у сприйнятті та здатності планувати маршрут у реальному часі, враховуючи як виробничі, так і людські фактори. Для цього слід розробити ефективні системи виявлення перешкод.

Найбільша кількість досліджень робототехніки у птахівництві зосереджена на системах вільного виходу. Однак роботи, які безпосередньо контактують із тваринами, можуть становити ризик для останніх і тому зазвичай працюють повільніше. Щоб зменшити ці ризики, роботи мають бути оснащені механізмами уникнення або контролю контакту. Одним із рішень є безконтактні системи, наприклад, роботи-маніпулятори, змонтовані на стелі. Проте така технологія складна у впровадженні на вже існуючих фермах і вимагає перебудови інфраструктури. Іншим підходом є використання м'яких матеріалів, які мінімізують можливість пошкодження тварин.

І все ж, у деяких випадках контакт між роботом і твариною неминучий — наприклад, для виявлення хворих птахів, їх захоплення й ізоляції. Поєднання таких роботів із системами виявлення захворювань уже продемонструвало свою ефективність. Для підвищення рівня благополуччя та біобезпеки доцільно інтегрувати в роботи системи раннього попередження для оперативного реагування на проблеми зі здоров'ям птахів.

Птахоферми відрізняються за розмірами та організацією, але більшість досліджень проводиться у контрольованих умовах або на невеликих фермах. Необхідні додаткові випробування роботів на великих птахофермах, зокрема дослідження координації декількох роботів для ефективної спільної роботи.

Безпечна та ефективна взаємодія між роботами і тваринами потребує розуміння специфіки соціальної поведінки окремих видів. Поки що таких досліджень небагато. Потрібні нові роботи, які враховуватимуть механізми соціального навчання, що сприятимуть здоров'ю й добробуту тварин у взаємодії з роботами. Особливу увагу слід приділяти дизайну апаратного забезпечення і функціоналу, щоб адаптувати роботів до умов комерційних ферм.

Інтеракція роботів із тваринами створює як нові можливості, так і виклики. Наземні роботи можуть сприяти підвищенню активності птахів, зменшенню контакту з підстилкою, покращенню якості кісток, здоров'я лап і стану оперення. Водночас підвищення активності може призвести до збільшення енергетичних витрат, що ще не достатньо вивчене. Існує припущення, що така активність може зменшити накопичення поживних речовин у яйцях і знизити їх масу. Майбутні дослідження повинні зосередитись на впливі роботів на споживання корму, вагу яєць і коефіцієнт конверсії корму.

Також важливо оцінити рівень стресу, пов'язаного з роботизацією: чи викликають роботи менший або більший дискомфорт у тварин порівняно з людьми. Існують докази, що роботи можуть знижувати ризик раптової паніки та передавати менше збудників захворювань, ніж люди. Але реакція птахів на роботів на різних етапах життя досліджена недостатньо. При цьому доведено, що птахи здатні формувати прихильність до навіть штучних об'єктів, і раннє знайомство з роботами зменшує страх перед ними.

Використання роботів може бути дорогим, особливо для невеликих ферм. Тому важливо проводити економічні оцінки доцільності впровадження роботів, беручи до уваги вплив на людську працю, здоров'я тварин і виробничі показники.

Створення ефективних роботів для птахівництва вимагає міждисциплінарного підходу з участю фахівців у галузях машинобудування, програмування, аналізу даних, генетики, поведінки тварин і ветеринарії. Лише завдяки такій комплексній інтеграції знань можна створити рішення, що відповідатимуть складним вимогам галузі, забезпечуючи високу ефективність, продуктивність і добробут тварин.

3.1.6. Висновки

Застосування робототехніки у птахівництві має значний потенціал, який ще належить повною мірою реалізувати. Попри обмеженість сучасних досліджень у цій сфері, вже наявні розробки свідчать про здатність роботизованих систем модернізувати галузь, зменшуючи залежність від людської праці та суттєво підвищуючи ефективність управління шляхом моніторингу стану тварин і навколишнього середовища. Проте цей потенціал наразі використано лише частково. Необхідні подальші дослідження для повноцінного впровадження робототехніки у виробничі процеси та покращення добробуту тварин.

У процесі інтеграції робототехнічних систем у птахівництво важливо враховувати особливості взаємодії роботів з тваринами. Ефективні рішення

мають ґрунтуватися не лише на інженерних інноваціях, але й на глибокому розумінні потреб і поведінки птиці. Таке поєднання є критично важливим для забезпечення гармонійної взаємодії, що підтверджується дослідженнями, присвяченими вродженим реакціям і поведінковим особливостям курчат і дорослих курей.

Серед основних викликів, які потребують уваги, — розширення практики обміну даними та розробка відкритих рішень. Це необхідно для належної оцінки впливу робототехніки на стан тварин і забезпечення їхнього добробуту.

Загалом, поєднання технологічних інновацій із глибоким розумінням потреб тварин та очікувань суспільства відкриває перспективи для підвищення продуктивності та добробуту в птахівництві завдяки роботизації

3.2 ОГЛЯД ПРОГРЕСУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ БЕЗКОНТАКТНИХ МЕТОДІВ ВІЯВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО РІСТ ПТИЦІ

3.2.1 Вступ. В умовах зростання світового населення та необхідності сталого розвитку, безконтактні технології виявлення стали важливим інноваційним напрямом у птахівництві. Концепція «Птахівництва 4.0» передбачає впровадження сучасних інформаційних технологій для цифровізації процесів вирощування птиці та підвищення ефективності всього виробничого ланцюга.

Традиційне птахівництво характеризується великими поголів'ями, тривалими термінами фенотипування, високими затратами праці, суттєвими стресовими реакціями у тварин та недостатньою точністю даних. Це значно стримує розвиток точного землеробства та сучасних технологій селекції. Фенотипування та документування залишаються основними джерелами інформації про індивідуальні характеристики особин, як-от швидкість росту, маса тіла, морфологічні та фізіологічні показники. Успішна селекційна робота неможлива без надійних і точних фенотипових даних. Нестача таких даних, зокрема у порівнянні з обсягами геномної інформації, зумовила зміщення акцентів у селекції з генетики на розробку високоякісних методів збору фенотипової інформації.

Середовище пташників часто характеризується пилом, недостатнім освітленням, активним рухом птиці та високою щільністю поголів'я, що ускладнює систематичний збір даних. Застосування глибинного навчання, зокрема згорткових нейронних мереж, дозволяє подолати ці проблеми. Сьогодні фермери отримують можливість аналізувати поведінкові реакції, стан здоров'я та ідентифікувати окремих особин навіть у щільному стаді, що створює підґрунтя для автоматизованого збору фенотипових даних.

У птахівництві вже досягнуто значного прогресу в моніторингу росту, оптимізації годівлі та прогнозуванні маси тіла. Наприклад, розроблено алгоритми для відстеження активності пташенят з метою оцінки їх рухової активності та подальшого прогнозу темпів росту. Також створено систему

Chicken-Net — інструмент для оцінки стану оперення несучок, який дозволяє передбачити їх майбутній стан. Сучасні безконтактні технології значно підвищують точність, зменшують потребу у ручній праці та підвищують ефективність ведення господарства. Інтеграція інтелектуальних алгоритмів і багатомодальних систем, які поєднують різні сенсори та типи даних, відкриває нові можливості для моніторингу.

Разом із тим, у процесі впровадження безконтактних методів контролю в умовах реальних ферм виникають певні труднощі. Серед них — потреба у додаткових прикладних рішеннях та необхідність великих обсягів розмічених даних для навчання моделей глибокого навчання.

У цьому дослідженні здійснено аналіз наукової літератури за період із січня 2014 по вересень 2024 року. За ключовими словами «зір», «звук» та «сенсори» у поєднанні з терміном «птахівництво» було відібрано 288 публікацій, присвячених вивченню безконтактних методів отримання інформації про птицю. Застосування оператора AND у наукових базах даних дозволило звузити пошук до статей, які зосереджуються саме на птиці як об'єкті дослідження та безконтактному контролю як методі. Всі ці праці свідчать про суттєвий потенціал автоматизованого моніторингу в оптимізації виробничих процесів у галузі, яка раніше значною мірою спиралася на людський фактор.

Удосконалення точності та ефективності завдяки використанню технологій безконтактного контролю підтверджує початок нової епохи — стійкого, ефективного та орієнтованого на добробут тварин птахівництва.

3.2.2. Застосування і вплив безконтактних технологій виявлення у фенотипуванні тварин для селекції

3.2.2.1 Практичне підґрунтя безконтактних технологій виявлення для фенотипування у селекції

Безконтактне виявлення птиці — це технологія, що базується на машинному зорі, спектроскопії, акустиці та інших принципах, поєднаних з відповідними приладами для оцінки фізичних характеристик, зовнішніх дефектів та стану здоров'я птиці без прямого контакту з нею. В умовах зростання світового населення та підвищення попиту на продукцію птахівництва виникає нагальна потреба у виведенні нових порід із покращеними ознаками. Ручне спостереження не завжди дозволяє своєчасно та повною мірою виявити фенотипові ознаки, що може негативно впливати на селекційні результати. Безконтактні технології надають можливість точного і оперативного моніторингу. Сучасні алгоритми машинного навчання дозволяють ефективно аналізувати візуальні та звукові дані.

Датчики є ключовими компонентами систем безконтактного виявлення. Сучасні інфрачервоні та візуальні сенсори використовуються для вимірювання пошкодження оперення, визначення розмірів тіла та інших параметрів. Однак дані з окремих сенсорів є обмеженими, тому об'єднання інформації з кількох джерел (сенсорна ф'юзія) дозволяє отримати цілісну картину. Наприклад, поєднання RGB-камер з інфрачервоними сенсорами дає змогу виявляти теплові

патерни, а комбінація RGB-камер з сенсорами глибини — отримувати кольорову просторову інформацію. Водночас синхронізація та узгодження даних із різних сенсорів є складним завданням, тому критичну роль відіграють калібрування даних і вдосконалені алгоритми обробки.

Окремим викликом у попередній обробці даних є отримання чітких зображень та фільтрація шумів. На якість сирих даних можуть впливати такі фактори, як освітлення, пил, рух та інші перешкоди. Для вирішення цих проблем застосовуються інструменти для зниження шумів, фільтрації, а також глибокі нейронні мережі. Важливим напрямом є розробка спеціалізованих методів попередньої обробки даних, адаптованих до умов пташників, включаючи рух птахів і їх перекриття в кадрі.

Технології виділення ознак птахів відіграють вирішальну роль. Зокрема, методи розпізнавання об'єктів та моделі сегментації зображень значно покращують точність і швидкість ідентифікації птахів. Завдяки аналізу зовнішнього вигляду й поведінкових характеристик (таких як колір і текстура пір'я, розміри тіла) можливо точно ідентифікувати окремих особин навіть у складному середовищі. Інтеграція таких технологій у систему керування селекцією забезпечує точне прийняття рішень у реальному часі.

Переваги безконтактного виявлення в управлінні селекційним процесом є значними. Технологія сприяє підвищенню ефективності оцінки відтворюваності, контролю росту та розвитку, а також моніторингу здоров'я. Безконтактне спостереження за поведінкою птиці дозволяє виявляти потенційні генетичні ознаки. Впровадження комп'ютерного аналізу, включаючи великі мовні моделі, знаннєві графи та міжмодальний аналіз, демонструє високу здатність систем до оцінки фенотипових ознак селекційної птиці. У підсумку, безконтактні технології є ефективним інструментом для безстресового, постійного моніторингу з мінімізацією фізичної праці та максимізацією результативності. У таких системах використовуються методи аудіоаналізу, візуального спостереження у видимому та інфрачервоному діапазонах, а також з використанням глибинного бачення.

3.3.2.2 Виявлення зовнішніх ознак у птиці

Оцінка зовнішньої форми є критично важливою для селекції птахів. У зв'язку з розширенням ринку виникає потреба у створенні високопродуктивних порід на основі зовнішніх фенотипових ознак. Традиційні методи, що ґрунтуються на візуальній оцінці та приблизних вимірюваннях, поступово витісняються безконтактними системами, які забезпечують точну та ефективну діагностику за допомогою штучного інтелекту (**рис.3.2.1**).

Зокрема, виявлено зв'язок між розміром та кольором гребеня курей і їх репродуктивними показниками. Розроблені системи комп'ютерного зору, що використовують методи сегментації об'єктів, дозволяють виділяти зображення гребеня, аналізувати його кольірну насиченість і таким чином оцінювати стан здоров'я птиці. Також реалізовано інтелектуальні системи відеоспостереження, які з використанням алгоритмів розпізнавання об'єктів відстежують зміни

кольору гребеня курей у різні вікові періоди. Ці системи поєднують сегментацію та виявлення контурів, демонструючи перспективність технологій комп'ютерного зору для безконтактної оцінки.

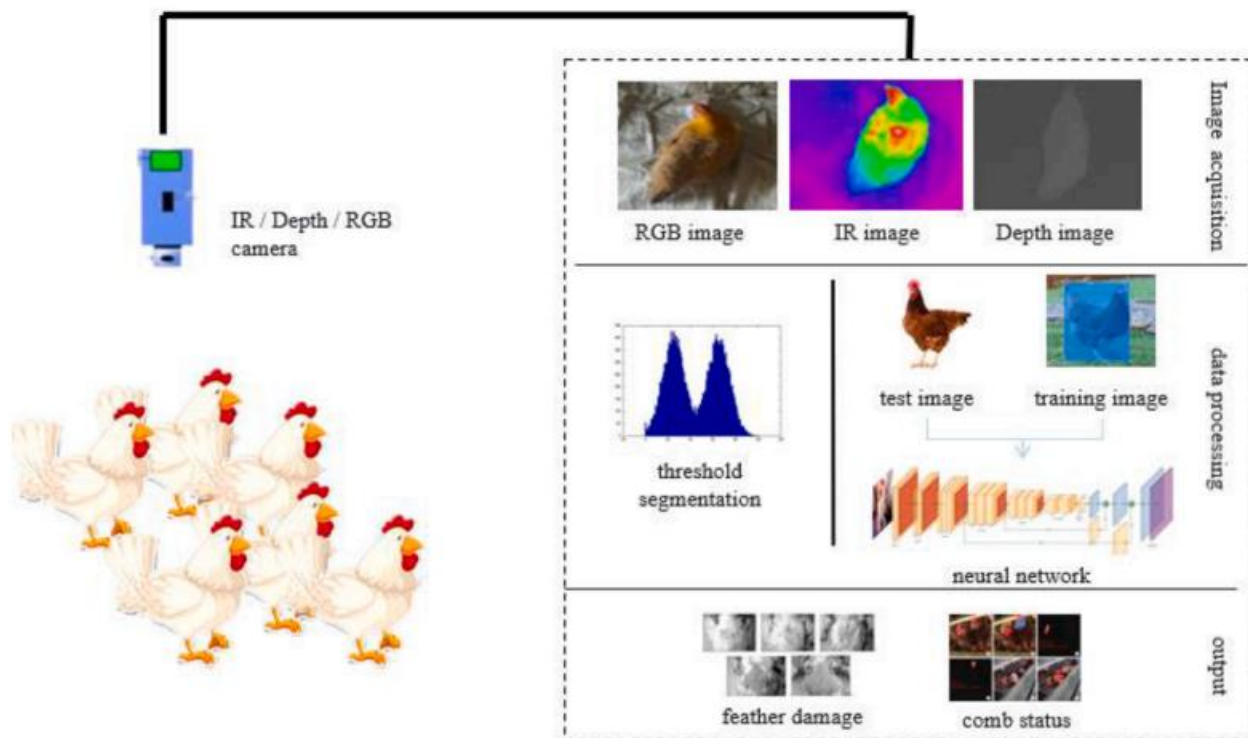


Рис. 3.2.1 Принцип методики, що застосовується для виявлення ознак зовнішності.

Щодо оперення — виявлено, що птиця з низьким ступенем опереності втрачає більше тепла і, відповідно, витрачає більше енергії на терморегуляцію. Інфрачервона термографія дозволяє вимірювати температуру поверхні тіла, що прямо корелює зі станом оперення. Розроблені системи інфрачервоного сканування можуть автоматично визначати зони з хорошим, середнім та поганим оперенням. Також запропоновані методики об'єктивного визначення пошкодження пір'я, які порівнюються із традиційними візуальними оцінками різних частин тіла (наприклад, шия, спина, живіт). У цьому контексті розроблено нейронні мережі, які поєднують видиме та глибинне зображення й здатні з високою точністю передбачати оцінку стану оперення. Окремі моделі, що працюють з RGB та тепловізійними зображеннями, дозволяють не лише точно визначити стан оперення, але й візуалізувати ділянки з найбільшими пошкодженнями за допомогою теплових карт.

Попри значний прогрес у використанні безконтактних технологій для оцінки зовнішніх фенотипів птиці, залишається багато аспектів, що потребують подальших досліджень та вдосконалення. Найпоширеніші напрямки використання безконтактного виявлення у системах моніторингу зовнішніх ознак птиці охоплюють діагностику гребеня, оперення та терморегуляційних властивостей.

3.2.3 Визначення розмірів тіла, маси та споживання корму птиці

Зі зростанням обсягу досліджень у галузі комп'ютерних технологій методи отримання даних про ріст птиці (розміри тіла, маса, споживання корму) зазнають значних змін. Точність моніторингу цих показників у племінних птахів є ключовим індикатором ефективності виробництва. Технічні принципи, що застосовуються для визначення розмірів тіла, маси та споживання корму, наведено на **рис. 3.2.2**.

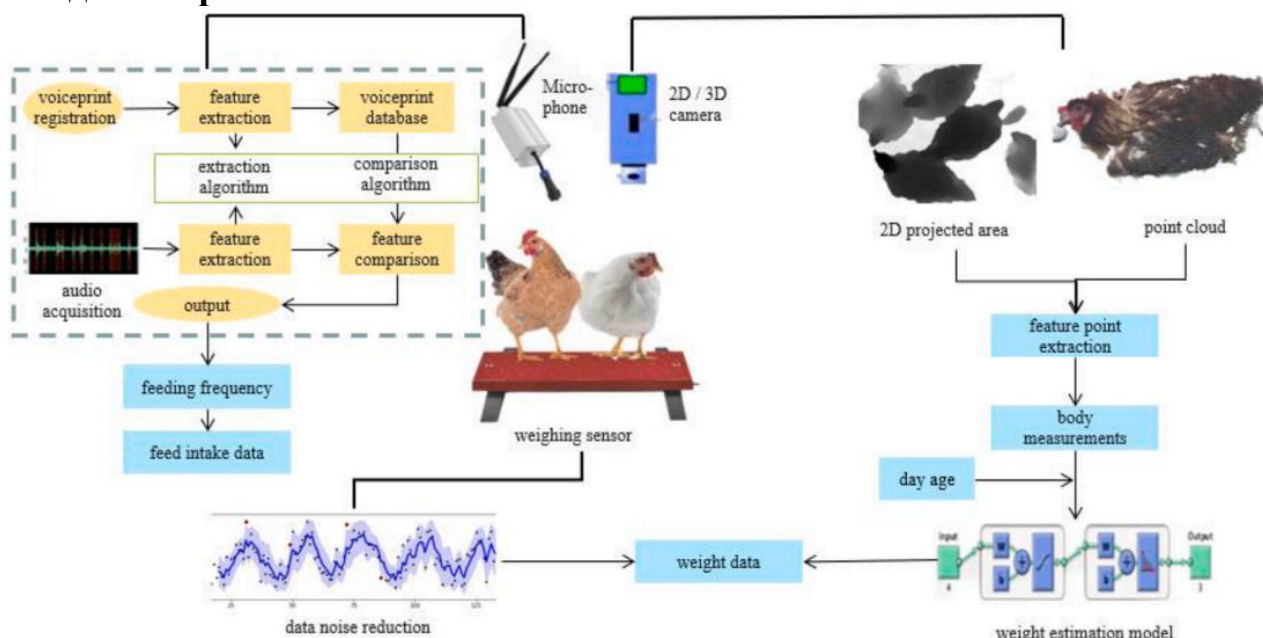


Рис. 3.2.2 Принцип технології, що застосовується для визначення розміру тіла, маси тіла та споживання корму.

У сфері визначення розмірів тіла досягнуто певного прогресу в застосуванні машинного зору для вимірювання параметрів живих курчат. Наприклад, використовуються камери, що знімають курчат згори та дозволяють виділити проєкційну площу тіла. Також можуть додатково визначатися такі показники, як периметр, опуклість, довга та коротка осі. Окремі методи поєднують згладжування країв тривимірної точки хмари з біометричними ознаками, що дозволяє оцінювати ширину грудної клітки, довжину гомілки та довжину напівзануреного корпусу. Середня похибка при визначенні цих параметрів становила 6,64 %, 5,93 % та 3,34 % відповідно, а середній час обробки одного зображення – 8,8 секунди.

Сьогодні збір і аналіз даних за допомогою аудіо, зображень і сенсорів дозволяє ефективно виявляти порушення в стані птиці та відстежувати її ріст. Найбільш точним методом вимірювання споживання корму та маси є використання тензодатчиків. Створено платформи збору даних, що дозволяють оцінювати середню якість курей із використанням алгоритмів машинного навчання, таких як гаусові моделі змішування, ізольовані ліси та кластеризація на основі щільності. В інших системах тензодатчики поєднуються з RFID-

мітками для точного обліку корму кожної окремої птиці в умовах вільного утримання.

Також розроблено звукові алгоритми, які дозволяють ідентифікувати звуки дзьобання під час споживання корму за допомогою контактних мікрофонів. Удосконалені алгоритми забезпечують можливість безперервного моніторингу годівлі кількох курей одночасно. Наприклад, коефіцієнт кореляції між результатами алгоритму та даними з ваги досягав 0,994, а точність класифікації звуків споживання корму – понад 90 %.

Машинне бачення та штучний інтелект дедалі частіше використовуються для оцінки маси птиці на основі параметрів розмірів тіла та інформації про вік. У дослідженнях з використанням 2D-зображень будуються моделі лінійної регресії на основі площі проєкції тіла та віку, з середньою похибкою від 0,04 % до 16,47 %. При більш складному підході використовується п'ять основних ознак (площа, периметр, опукла площа, довга та коротка осі) у поєднанні з регресійними алгоритмами, що забезпечує точність з похибками менше 9 %.

При використанні 3D-зображень (наприклад, з глибокими камерами) проводиться сегментація птахів, які торкаються один одного, після чого зображення аналізуються за 13 ознаками, включно з віком, проєкційною площею, обхватом тощо. Такі моделі показують кращі результати за точністю – з середньоквадратичною похибкою до 48 г і відносною похибкою лише 3,3 %. Загалом, використання тривимірних зображень забезпечує вищу точність порівняно з двовимірними підходами. У сучасних дослідженнях акцент зміщується з традиційного машинного навчання на глибоке навчання, що демонструє перспективні результати.

Безконтактні методи визначення фізіологічних параметрів птиці дозволяють здійснювати безперервний моніторинг, що є суттєвим досягненням порівняно з традиційними методами спостереження. Серед них машинний зір має особливо високий потенціал для галузі птахівництва завдяки високій пропускній здатності та широкому діапазону виявлення. Водночас є потреба в адаптації алгоритмів до умов слабкого або змінного освітлення у пташниках, а також до активних рухів птиці.

3.2.2.4 Виявлення скелетних ознак у птиці

Кістки птиці мають малі розміри та нерегулярну форму, що ускладнює їх точне вимірювання за допомогою традиційних інструментів. Існуючі безконтактні методи виявлення також мають певні недоліки, зокрема високу вартість обладнання та складність експлуатації. Важливим обмеженням є також складність отримання зразків, оскільки відбір проб у живих птахів пов'язаний з ризиками та потребує дотримання принципів добробуту тварин, а також ускладнене зберігання зразків, які чутливі до впливу зовнішнього середовища.

Сьогодні за допомогою обладнання, такого як ультразвукові пристрої та рентген, традиційні методи поступово витісняються точнішими та ефективнішими безконтактними системами виявлення. Принцип дії

рентгенівських систем ілюстровано на рис. 3.2.3, а ультразвукових — на рис. 3.2.4.

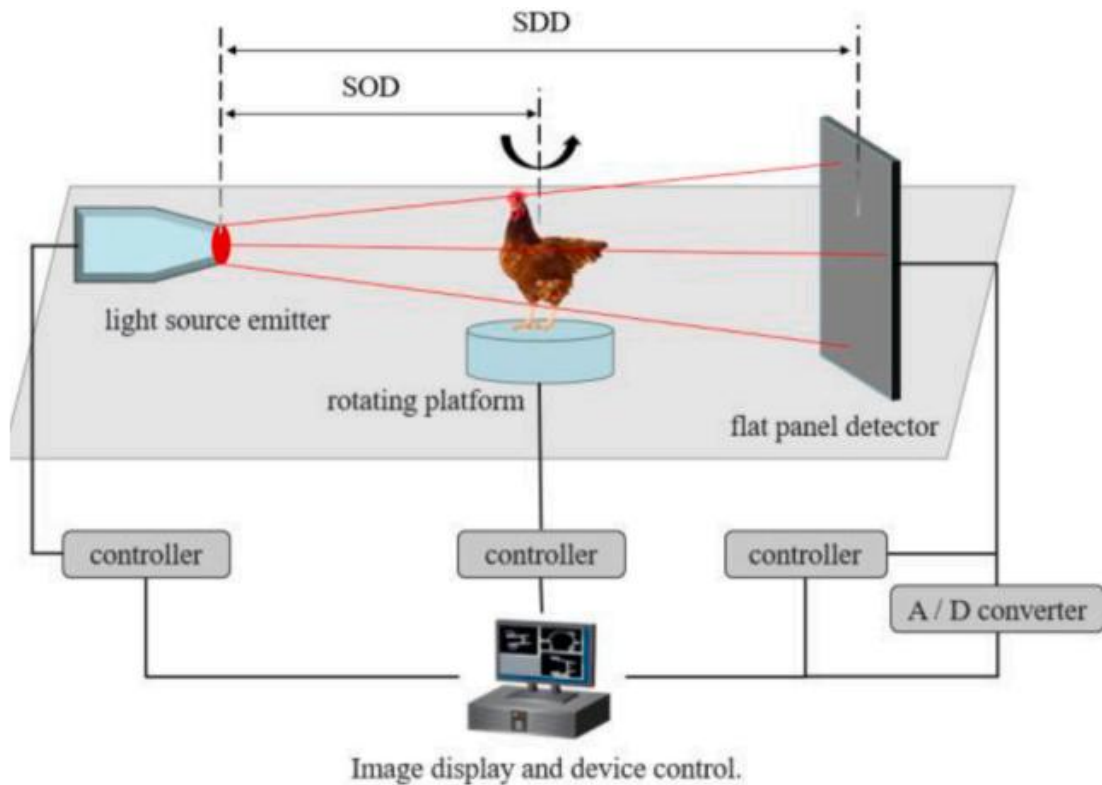


Рис. 3.2.3 Принцип рентгенівського контролю

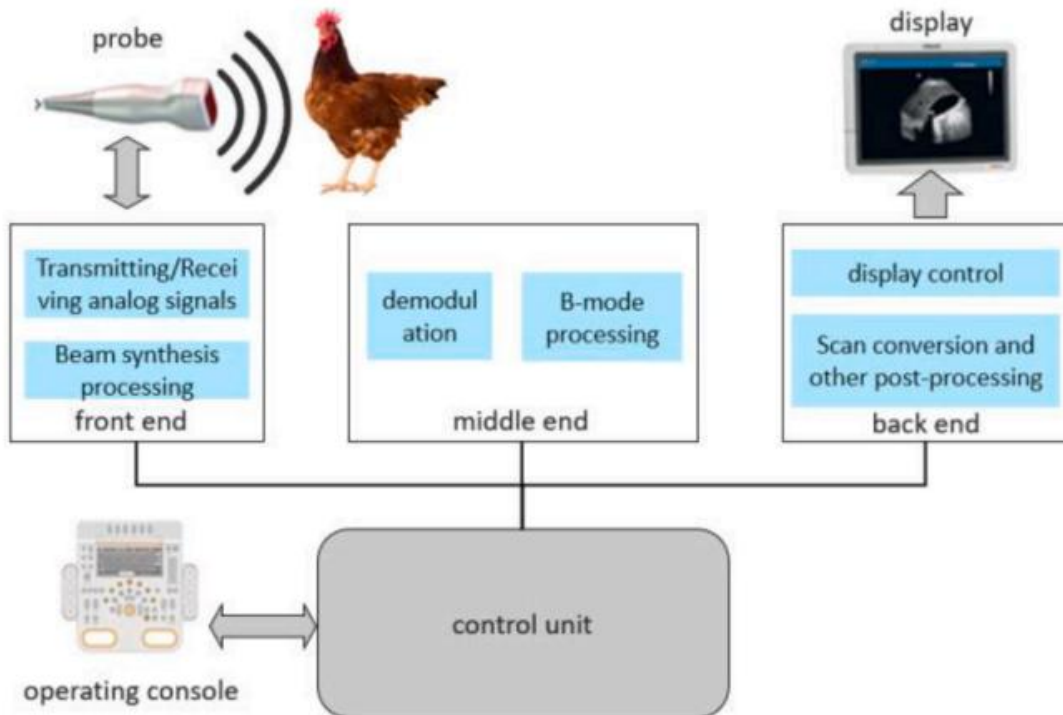


Рис. 3.2.4 Принцип ультразвукового контролю

Сучасні цифрові методи дозволяють виявляти зміни морфології кісток на ранніх стадіях, оцінювати мінеральну щільність, фіксувати деформації та визначати ступінь ураження кісток. Зокрема, використання портативного рентген-обладнання дає змогу класифікувати птицю за ступенем здоров'я

кісткової системи: від здорових особин до тих, що мають серйозні порушення. Технології мікрокомп'ютерної томографії дають змогу аналізувати як макро-, так і мікроструктуру кісткової тканини, виявляючи вікові зміни, зменшення кількості трабекул і зниження міцності кісток.

Ультразвукові технології також використовуються для виявлення пошкоджених кісток у м'ясі курчат, що дозволяє контролювати якість та здоров'я продукції. Водночас висока чутливість до умов середовища, таких як температура, вологість та пил, може негативно впливати на точність вимірювань і скорочувати строк служби устаткування.

3.2.2.5 Поєднання безконтактних технологій виявлення з робототехнікою

Інтеграція робототехніки з безконтактними технологіями виявлення змінює підходи до управління у птахівництві. Використання роботизованих систем із візуальними камерами, інфрачервоними сенсорами або системами глибинного бачення дає змогу ідентифікувати мертвих, ослаблених, хворих та непродуктивних птахів з високою точністю. Такі роботи можуть працювати у складних умовах птахоферм: при підвищеній температурі, вологості та запиленості.

Інспекційні роботи, як правило, є модульними платформами, здатними виконувати декілька завдань одночасно. Вони можуть поєднувати моніторинг стану птиці з оцінкою параметрів мікроклімату (температура, вологість, рівень вуглекислого газу, швидкість повітря тощо). Також розробляються мобільні платформи для визначення маси птахів та інших фізіологічних характеристик.

Робототехніка також дозволяє автоматизувати монотонні або важкі завдання. Наприклад, системи машинного зору з використанням штучного інтелекту аналізують термальні та видимі зображення для виявлення мертвих птахів і керують механізмами їх видалення. Спеціалізовані роботи зі схватами (гнучкими або пневматичними) демонструють ефективність у задачах захоплення, перенесення та сортування в умовах птахоферм.

Автоматизовані системи збору яєць, наприклад, використовують спектральну візуалізацію для виявлення яєць на підлозі та класифікації за станом: ціле, тріснуте, з кров'ю, нестандартне тощо. Завдяки застосуванню глибокого навчання вбудовані на роботи моделі здатні сортувати продукцію за кількома ознаками одночасно.

Хоча роботи ще не повністю замінили всі ручні процеси на фермах, активно ведеться розробка спеціалізованих систем для виконання конкретних завдань: прибирання, моніторинг, сортування, підрахунок та обслуговування. Така техніка поступово охоплює всі аспекти управління у птахівництві.

Поєднання робототехніки та безконтактних методів контролю підвищує ефективність виробництва, сприяє покращенню добробуту тварин, дає змогу своєчасно виявляти відхилення у поведінці птахів і зменшити контакт працівників із тваринами, що важливо для біобезпеки. З розвитком цих технологій з'являються нові можливості подолання актуальних викликів галузі,

таких як нестача робочої сили, фрагментованість даних та ризики у процесі розведення. Тенденція до інтеграції роботів із системами неруйнівного контролю представлена на **рис. 3.2.5**

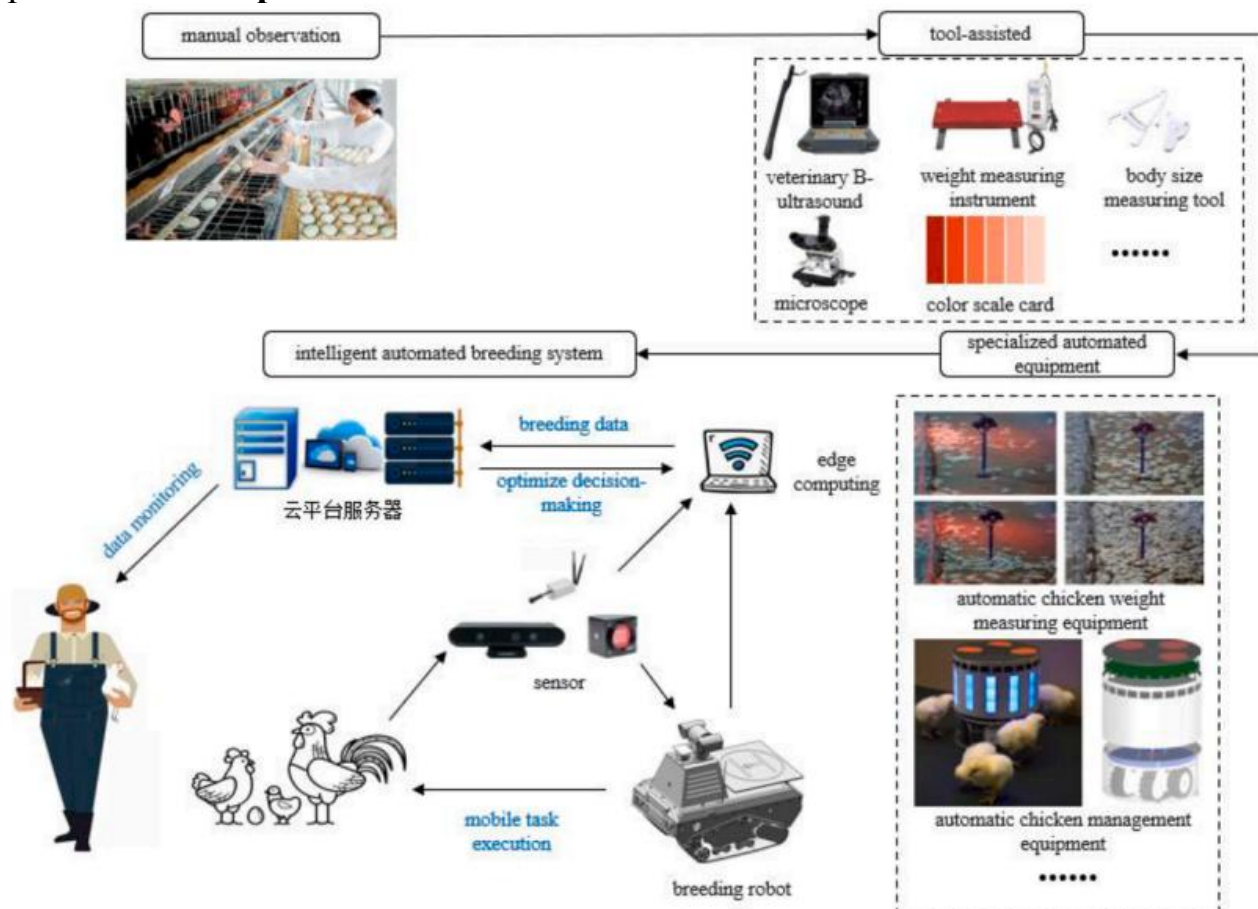


Рис. 3.2.5 Тенденції інтеграції безконтактного виявлення з іншими технологіями.

3.2.3. Найвні технічні виклики

Технології безконтактного виявлення є передовими у сфері управління птахівництвом, однак їх інтеграція з реальними виробничими процесами стикається з низкою труднощів. По-перше, це висока вартість обладнання: цифрові сигнальні процесори (DSP), програмовані користувачем вентиляльні матриці (FPGA) та графічні процесори (GPU) є дорогими та складними у використанні. Це становить не лише фінансову, а й технічну проблему, адже для їх повноцінного використання необхідні глибокі знання в галузі програмування та апаратного забезпечення, які зазвичай відсутні в умовах фермерських господарств. Наприклад, DSP, що важливі для задач реального часу, таких як класифікація пошкоджень, коштують від 500 до 2000 доларів США й вимагають знань у цифровій обробці сигналів та вбудованому програмуванні. FPGA з ціною 1000–3000 доларів та GPU вартістю 1500–10000 доларів потрібні для класифікації об'єктів, але потребують володіння мовами опису апаратури та вміння працювати з логічними мережами високої складності.

По-друге, застосування безконтактних технологій у птахівництві ускладнюється чинниками навколишнього середовища. Наприклад, у пташниках

часто присутній пил, який може осідати на об'єктиві камери. Це значно погіршує якість зображень, ускладнюючи точне розпізнавання об'єктів на основі алгоритмів комп'ютерного зору. Додатковою проблемою є шумове середовище: крики птахів, звуки від роботи обладнання тощо, які заважають ефективній обробці аудіосигналів. Для безконтактних методів, що базуються на аудіоаналізі, це створює серйозні труднощі у виокремленні корисної інформації.

У зв'язку з цим вкрай важливим є застосування високоефективних методів видалення фону та алгоритмів відстеження об'єктів, стійких до змін навколишнього середовища.

І, нарешті, хоча інспекційне обладнання зазвичай є модульним і дозволяє інтеграцію з передовими технологіями, така інтеграція у птахівництві ще на дуже низькому рівні. Здебільшого використовуються базові комбінації загальновідомих технологій, що призводить до значного технологічного одноманіття. Відсутність інновацій і проривів у дослідженнях уповільнює подальший прогрес. Наприклад, виявлення пошкоджень пир'я часто базується на інфрачервоній термографії для моніторингу фенотипових ознак (наприклад, площі пошкодження), і такі методи залишаються на примітивному рівні.

3.2.4. Перспективи розвитку технологій

Одним із важливих напрямів майбутнього розвитку птахівництва є застосування безконтактного багатоданого виявлення з метою створення технологій, таких як знімне ідентифікування, тривимірне моделювання птиці та створення баз даних індивідуальної інформації про тварин. На сьогодні такі підходи майже не описані в літературі та ще не впроваджені на практиці.

3.2.4.1 Технологія знімного ідентифікування

Технології неруйнівного контролю повинні бути глибоко інтегровані з робототехнікою. Таке поєднання дозволить збільшити зону моніторингу та підвищити ефективність обладнання, а також краще адаптувати його до умов пташників. Це відкриває нові можливості для безконтактних методів виявлення, таких як онлайн-оцінювання стану птиці та інтелектуальна діагностика захворювань. У перспективі така інтеграція сприятиме подальшому розвитку безконтактних технологій контролю.

3.2.4.2 Тривимірне моделювання птиці

Наразі виявлення фенотипічних характеристик птиці ґрунтується переважно на двовимірних зображеннях, з яких визначають площу поверхні тушок. Однак такий підхід не дозволяє отримати інформацію про параметри, як-от окружність грудної клітки чи довжина гомілки. У майбутньому слід створити технологію тривимірного моделювання птиці для більш точного вимірювання розмірів тіла. Поєднання цих параметрів із віком тварини дасть змогу опосередковано визначати її масу. До того ж 3D-моделі краще відображають зовнішні характеристики птиці, що підвищує точність оцінювання зовнішнього фенотипу.

3.2.4.3 База даних індивідуальної інформації про птицю

Варто створити базу даних індивідуальної інформації про птицю, яка охоплюватиме різноманітні породи з різних господарств — з різними генетичними характеристиками, особливостями росту та адаптаційними можливостями. Така база повинна включати дані про тварин на всіх етапах розвитку — від раннього віку до дорослого стану — з докладним описом характеристик росту, поведінки та фізіологічних показників. Вона слугуватиме джерелом даних для ідентифікації поведінки, моделювання маси тіла та моніторингу стану здоров'я. Це сприятиме вдосконаленню процесів селекції та ефективнішому управлінню в галузі птахівництва.

3.2.5. Висновки

Останніми роками технології безконтактного виявлення відіграють важливу роль у птахівничій галузі, особливо у сфері розведення птиці. Такі технології значно зменшують трудомісткість роботи персоналу, знижують витрати на утримання поголів'я та підвищують ефективність виробництва й якість продукції. Водночас застосування безконтактного моніторингу все ще стикається з рядом технічних обмежень: недостатньою точністю розпізнавання, високими вимогами до приладів, обмеженнями в розміщенні обладнання, одноманітністю методів збору зображень і обмеженим колом досліджуваних об'єктів. Усі ці аспекти потребують подальшого наукового опрацювання.

У перспективі очікується глибока інтеграція безконтактних технологій із алгоритмами глибокого навчання для забезпечення ефективного, безперервного та точного інтелектуального управління в галузі тваринництва. Наприклад, використання мобільних роботів із всеспрямованим збором зображень дозволить подолати обмеження у встановленні обладнання, підвищити ефективність моніторингу поведінки птиці та точність виявлення аномалій. Застосування тривимірної візуалізації та збирання даних про параметри тіла птиці за допомогою 3D-камери дозволить отримувати більш точну інформацію про фізичний стан. Водночас створення бази даних, що охоплює показники росту, оцінку маси тіла, стан скелета, якість інкубаційних яєць тощо для різних порід і стадій розвитку, допоможе подолати обмеження досліджуваних об'єктів, підвищити точність розпізнавання та забезпечити якісну інформаційну базу для побудови детальних класифікаційних моделей.

Загалом, технології безконтактного моніторингу мають значний потенціал розвитку в галузі птахівництва. Їхні можливості щодо високопродуктивного, безконтактного та оперативного моніторингу роблять їх універсальними для аналізу зовнішніх ознак, особливостей росту та параметрів скелета птиці.

3.3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ПТАШНИКА В ЗИМОВИЙ ПЕРІОД ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ

3.3.1 Вступ. Основу м'ясного птахівництва в Україні становлять великі промислові птахофабрики, частка яких у загальному виробництві м'яса

перевищує 60%. Значна частина продукції птахівництва (понад 50%) отримується у пташниках з підлоговою системою утримання. З економічної точки зору така система вважається вигіднішою порівняно з іншими типами утримання, однак з технологічного погляду вона є набагато складнішою для ефективного керування.

Підлоговий пташник — це складний об'єкт із високою концентрацією птиці, обладнання та агресивного середовища. Умови виробництва характеризуються нестабільністю параметрів, значною кількістю випадкових збурень та складністю в моделюванні фізичних і біологічних процесів, що ускладнює створення ефективної системи автоматичного керування. Підтримання заданих параметрів мікроклімату, особливо температури, без надлишкового споживання енергоресурсів напряму залежить від якості роботи автоматизованої системи керування (АСК).

Промисловий пташник м'ясного напрямку розглядається як складний біотехнічний об'єкт регулювання з великою кількістю змінних і невизначених зв'язків. До об'єкта впливу належать:

- технологічні фактори (забезпечення годівлі, водопостачання тощо),
- параметри мікроклімату (температура, вологість, рівень вуглекислого газу, освітлення тощо),
- біологічні (фізіологічні) чинники (вік, порода, стан здоров'я, рівень стресу тощо).

Окрім цього, на систему постійно впливають випадкові зовнішні збурення, які можуть істотно змінювати результат функціонування.

Завдання. Відповідно доцільно здійснити розробку автоматизованої системи керування температурним режимом у пташнику із застосуванням сучасної елементної бази та енергоощадних алгоритмів, спрямованих на зменшення витрат енергії для підтримання оптимального мікроклімату.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати інформаційні потоки у пташнику та розробити на їх основі імітаційну модель теплового обміну;
- створити математичну модель та принципову схему теплоутилізатора (рекуператора) для повітря, що видаляється з пташника;
- обґрунтувати та підібрати сучасні технічні засоби автоматизації з урахуванням керування рекупераційними процесами;
- оцінити стійкість і якість роботи системи автоматичного регулювання температури;
- розробити алгоритми енергоефективного керування обладнанням для створення мікроклімату;
- визначити економічну ефективність впровадження розробленої системи автоматичного регулювання.

3.3.2. Основна частина

Вплив параметрів навколишнього середовища на біологічний об'єкт, зокрема, реалізується через технічний об'єкт. Експериментальні дослідження та

роботи в галузі фізіології тварин підтверджують, що біологічна система є нелінійною, багатовимірною, нестационарною та багатозв'язаною.

Пташник як технічний об'єкт — це просторово розподілена система з різнорідними мікрокліматичними параметрами, інерційна, багатозв'язна, схильна до дії випадкових зовнішніх збурень. Найбільші труднощі виникають під час підтримання стабільного температурного режиму в різних зонах приміщення, з урахуванням теплового розподілу, який змінюється в часі та просторі.

Функціональні схеми систем автоматизації

Функціональні схеми є основним технічним документом, що відображає функціонально-блокову структуру вузлів автоматичного контролю, управління та регулювання технологічних процесів, а також систему оснащення об'єкта управління засобами автоматизації — включаючи телемеханіку та обчислювальну техніку.

Загальні принципи побудови функціональних схем автоматизації:

1. Гнучкість і масштабованість. Рівень автоматизації повинен відповідати не лише поточним потребам, а й враховувати перспективи модернізації технологічного процесу. Необхідно забезпечити можливість розширення функцій управління.
2. Урахування виробничих умов. При проектуванні слід враховувати:
 - характер технологічного процесу;
 - вибухо- і пожежонебезпеку, токсичність, агресивність середовища;
 - параметри вимірюваного середовища;
 - відстані від датчиків та виконавчих механізмів до пунктів керування;
 - вимоги до точності та швидкодії засобів автоматизації.
3. Уніфікація технічних засобів. Системи автоматизації рекомендовано створювати на базі серійного уніфікованого обладнання, яке характеризується сумісністю, простотою у монтажі, взаємозамінністю та зручністю компоновки.
4. Використання сертифікованих приладів. У якості засобів вимірювання, збору, обробки та регулювання слід застосовувати сертифіковані автоматизовані пристрої, які відповідають державним стандартам.
5. Можливість розробки нових технічних рішень. У випадках, коли наявні серійні рішення не відповідають вимогам, необхідно формувати технічні завдання на розробку нових засобів автоматизації.
6. Підбір джерел живлення. При виборі обладнання, що потребує допоміжної енергії (електричної, пневматичної, гідравлічної), слід враховувати вимоги до вибухозахисту, агресивність середовища, швидкодію та надійність передачі сигналів на відстані.
7. Оптимальна кількість засобів управління. Не варто перевантажувати щити управління зайвими приладами. Надлишкова кількість обладнання ускладнює експлуатацію, знижує ефективність спостереження за ключовими параметрами, подовжує терміни пусконаладжувальних робіт і збільшує вартість проекту. Допоміжні засоби автоматизації рекомендується монтувати

на окремих щитах, розташованих безпосередньо у виробничих приміщеннях біля технологічного обладнання.

Розроблення функціональних схем систем автоматизації дає змогу вирішити низку важливих технічних завдань, а саме:

- обрати методи вимірювання ключових технологічних параметрів;
- здійснити обґрунтований вибір основних технічних засобів автоматизації, які найкраще відповідають умовам роботи на конкретному об'єкті;
- визначити тип приводу виконавчих механізмів, що забезпечують дистанційне або автоматичне керування запірно-регулюючими пристроями технологічного обладнання;
- спроектувати розміщення контрольно-вимірювальних та виконавчих пристроїв на щитах керування, пультах, безпосередньо на обладнанні або трубопроводах, а також визначити засоби візуалізації інформації про стан технологічного процесу.

Принцип роботи системи автоматичного регулювання мікроклімату.

У типовій реалізації витяжні вентилятори, розташовані в стінах пташника, працюють постійно, створюючи в середині приміщення знижений тиск. Завдяки цьому через припливні шахти до пташника надходить свіже повітря ззовні, забезпечуючи необхідний повітрообмін.

Сигнали управління формуються автоматичним контролером TIRC відповідно до даних температурного датчика, встановленого в пташнику. У разі пониження температури нижче заданого рівня контролер активує теплогенератори через пускачі. Якщо ж температура перевищує норму — активується частотний перетворювач, який регулює швидкість обертання витяжних вентиляторів, збільшуючи кратність вентиляції та сприяючи охолодженню повітря.

Частотний перетворювач налаштований таким чином, щоб мінімальна швидкість вентиляторів підтримувала базовий рівень повітрообміну, достатній для життєдіяльності птиці.

Крім цього, при зниженні температури у рекуператорі (датчик) контролер подає сигнал на привід регулюючої заслінки (через пускач NS), забезпечуючи повторне використання теплого повітря з метою енергозбереження.

Математичне моделювання процесів у пташнику

Процеси, що відбуваються у промисловому пташнику, описуються системами нелінійних диференціальних рівнянь, параметри яких залежать від вхідних та вихідних впливів. У більшості випадків аналітична апріорна модель таких процесів відсутня, що ускладнює управління й вимагає проведення ідентифікації. Застосування складних нелінійних моделей у системах керування також обмежене через труднощі реалізації їх у цифровому вигляді.

Утримання належного санітарно-гігієнічного стану повітряного середовища у пташнику неможливе без організованої вентиляції. Математична модель вентиляції ґрунтується на матеріальному балансі шкідливих речовин у

приміщенні. Ключовим параметром у цій моделі є витрата повітря, яка виконує функції керувальної змінної як для каналу температурного регулювання, так і для контролю загазованості.

Для розрахунку витрати повітря враховуються такі компоненти, як волога, вуглекислий газ, метан тощо. Найбільш критичним параметром для вибору режиму вентиляції є вологість повітря, яка найбільше впливає на інтенсивність повітрообміну.

За допомогою моделі, побудованої в середовищі Simulink, вдалося встановити залежність витрат енергоресурсів від віку птиці та зовнішніх кліматичних чинників. Результати експериментальних досліджень подані у вигляді графіків (рис. 3.3.1).

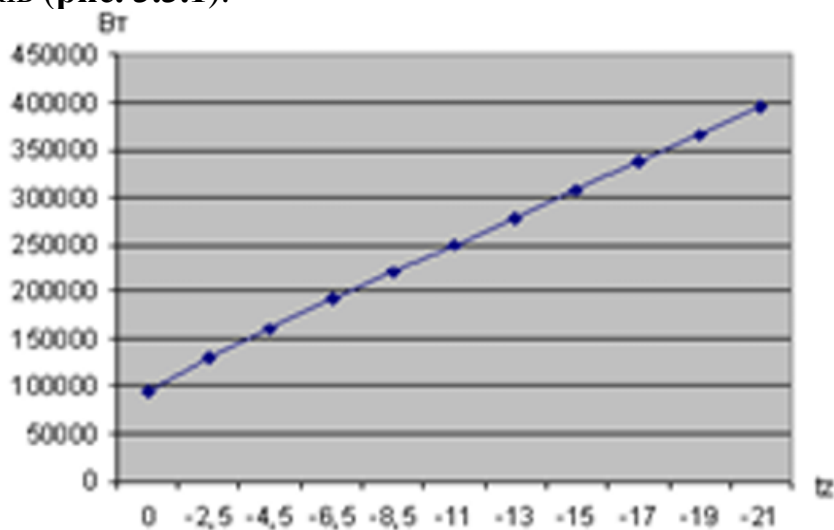


Рис. 3.3.1. Залежність витрат тепла на опалення пташника від зовнішньої температури до встановлення теплообмінника на об'єкті

З графіка змінної часової константи нагріву можна побачити, за який час об'єкт управління виходить у сталий режим залежно від віку біологічного об'єкта. Цей графік наведено на рис. 3.3.2.

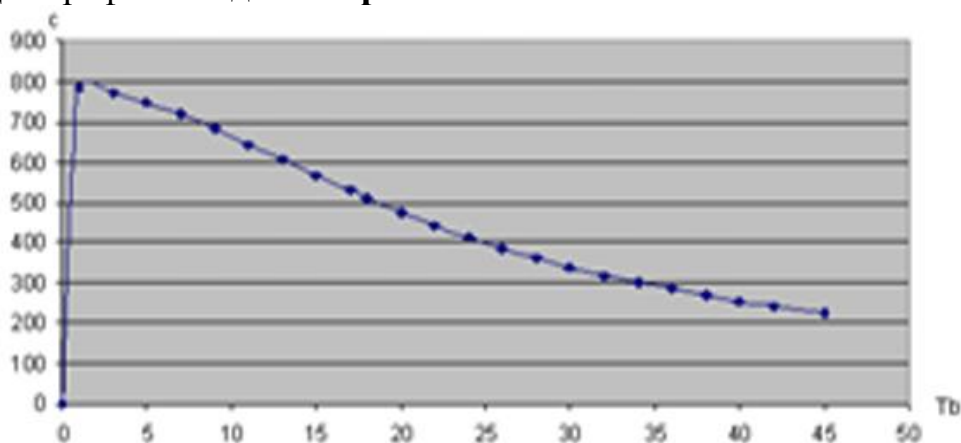


Рис. 3.3.2. Графік залежності часу виходу у сталий режим нагріву від віку бройлерів

З отриманих результатів можна простежити, як змінюється витрата вентиляційного повітря в залежності від віку бройлерів. Відповідний графік наведено на рис. 3.3.3.

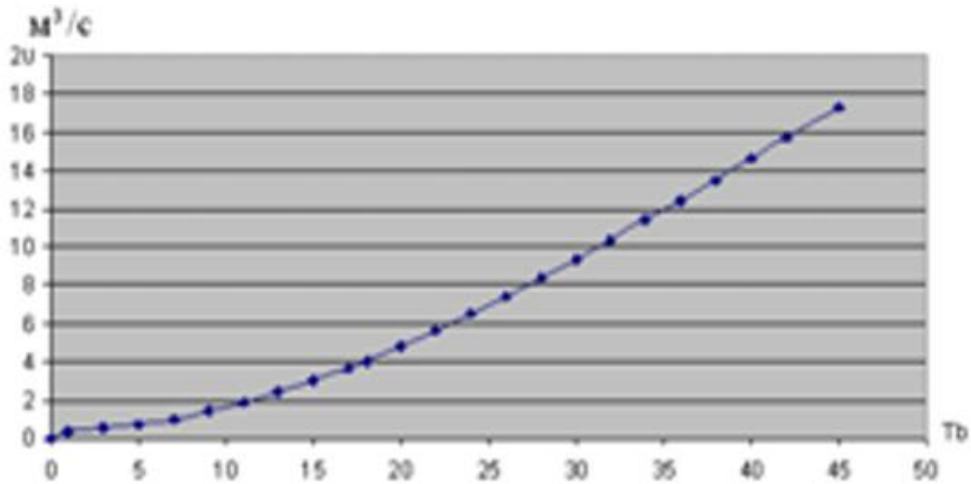


Рис. 3.3.3. Графік витрати вентиляційного повітря в залежності від віку бройлерів

Залежності нагріву від віку бройлерів, втрат тепла та сумарного нагріву наведені на рис. 3.3.4.

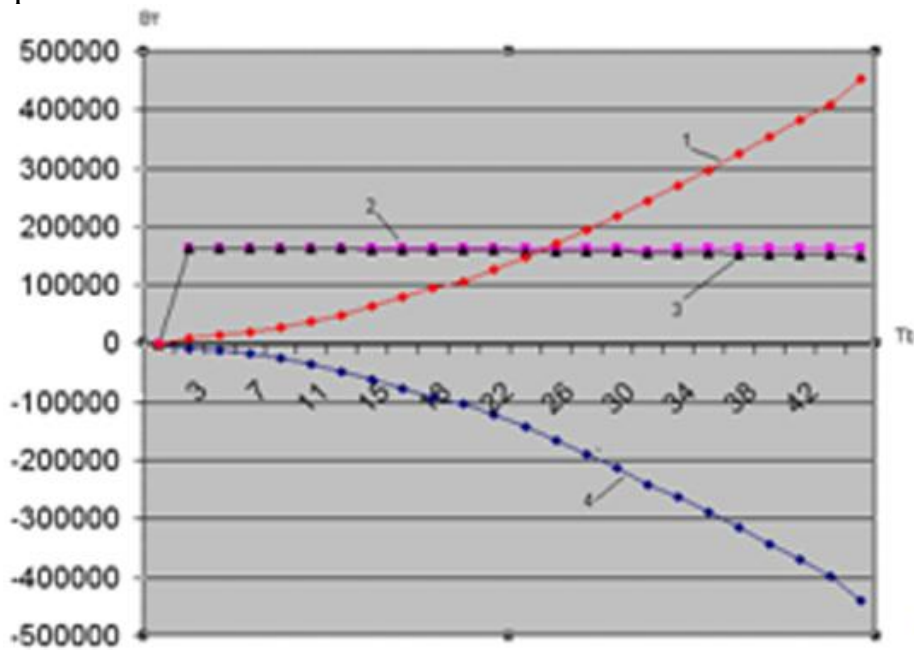


Рис. 3.3.4. Залежності нагріву від віку бройлерів: 1 – виділення тепла бройлерами залежно від їх віку; 2 – залежність додаткового нагріву від віку бройлерів; 3 – сумарна залежність нагріву від віку бройлерів; 4 – залежність теплових втрат.

Провівши ряд досліджень із зміною віку бройлерів у проміжку від 1 до 45 днів, можна зробити висновок, що з віком біологічний об'єкт набирає вагу, а разом із збільшенням ваги зростає й його тепловиділення, а також вологовиділення. У такому випадку зменшуються витрати на додатковий нагрів, проте збільшується об'єм вентиляційного повітря, що призводить до збільшення теплових втрат.

3.3.3 Висновки. Проаналізувавши отримані дані, можна дійти висновку, що для зменшення витрат на нагрівання та мінімізації втрат доцільним є використання теплообмінника. Принцип його роботи полягає у використанні теплого повітря, що видувається з пташника, для нагрівання повітря, яке надходить з вулиці. Таким чином досягається мінімізація витрат енергоресурсів.

3.4. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ВМІСТУ АМІАКУ В ПОВІТРІ НА АГРОПРОМИСЛОВИХ КОМПЛЕКСАХ

3.4.1 Вступ.

Системи контролю концентрації аміаку в повітрі розробляються переважно для тих підприємств, які можуть забезпечити необхідне фінансування. Великі агропромислові комплекси мають змогу оплачувати щомісячне обслуговування систем, придбавати дороге обладнання та залучати висококваліфікованих фахівців для налаштування і підтримки працездатності систем. Такі підприємства також володіють потужними обчислювальними ресурсами для обробки інформації та ведення баз даних.

Натомість малі підприємства, особливо у сільськогосподарському секторі, зокрема птахоферми, часто мають обмежений доступ до систем контролю — як за кількістю, так і за функціоналом, або взагалі не мають їх. На птахофермах зазвичай застосовують системи контролю вологості повітря, температури, вентиляції, але відсутні спеціалізовані системи для контролю вмісту аміаку.

3.4.2. Розробка системи

Тваринництво і птахівництво зазвичай ведеться у закритих приміщеннях, де склад повітря суттєво відрізняється від зовнішнього середовища. Наприклад, у пташниках присутні газоподібні речовини, такі як аміак, що виділяється з підстилки, оксид вуглецю від неефективно вентильованих газових нагрівачів, а також сірководень. Окрім цього, промислово-животноводчі комплекси є джерелом значного хімічного і біологічного забруднення атмосферного повітря.

Ефективним способом боротьби із забрудненням повітря є технічні рішення, які дозволяють локалізувати та зменшувати концентрацію шкідливих речовин безпосередньо біля їх джерела. У найбільш насичених промислових комплексах за допомогою спеціалізованого обладнання можна знизити рівень забруднення до безпечних норм.

Система контролю загазованості в автоматичному режимі повинна безперервно збирати та обробляти інформацію про концентрацію аміаку в повітрі у достатньому обсязі для формування керуючих дій.

Для розробки системи обрана мікроконтролерна плата Arduino/Genuino Uno на базі мікроконтролера ATmega328. Ця платформа фактично є електронним конструктором та зручною середовищем для розробки електронних пристроїв. Arduino має широку популярність завдяки простоті та зручності мови програмування, відкритій архітектурі та відкритому програмному коду.

Перспективною апаратно-програмною платформою для системи контролю є плата Arduino Mega. Arduino дає можливість легко програмувати пристрої через USB без необхідності спеціальних програматорів. Це дозволяє комп'ютеру взаємодіяти з фізичним світом, отримуючи дані з різноманітних датчиків та керуючи виконавчими механізмами.

Вимоги до системи контролю рівня аміаку

Розроблювана система має відповідати широкому колу вимог і володіти таким функціоналом:

- автоматичний контроль рівня загазованості повітря;
- оповіщення про аварійні витoki аміаку;
- незалежне архівування всіх випадків спрацьовування датчиків та змін у блокуванні;
- можливість віддаленої передачі цих даних [3].

Основним завданням проекрованої системи є контроль концентрації аміаку в повітрі. Для цього потрібно вирішити наступні задачі:

- Обробка показань датчиків і контроль функціональності. Для цього необхідно обрати мікроконтролер, який буде приймати та обробляти сигнали від датчиків і за допомогою спеціальної програми керувати роботою пристрою.
- Візуальний інтерфейс. Для відображення актуальних параметрів системи передбачено використання дисплея, де оператор зможе бачити поточні показники та стан пристрою.
- Вимірювання концентрації аміаку. Для визначення вмісту аміаку застосовується газовий сенсор з необхідною чутливістю, що забезпечує точний моніторинг.
- Віддалений моніторинг і керування. Для передачі інформації та дистанційного управління використовується комунікаційний модуль, наприклад Wi-Fi.

3.4.3 Обґрунтування вибору апаратної бази

Проаналізувавши сучасні апаратні та програмні засоби автоматизації з підключенням до Інтернету, було обрано оптимальне рішення — мікроконтролер ATmega328.

Цей мікроконтролер є ідеальним вибором завдяки:

- низькій вартості;
- широкому поширенню;
- простоті програмування;
- широкому переліку функціональних характеристик.

Обраний мікроконтролер ATmega328 має ряд переваг, які визначають його ефективність для системи контролю:

- Низьке енергоспоживання — що дозволяє зменшити витрати енергії при роботі пристрою;
- Удосконалена архітектура AVR RISC — забезпечує високу продуктивність і ефективність обробки даних;
- 8-бітний мікроконтролер — достатній для реалізації необхідних функцій у системі.

3.5. СУЧАСНИЙ СТАН ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ІНКУБАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ В ГАЛУЗІ ПТАХІВНИЦТВА

3.5.1 Вступ. Упродовж останніх кризових років вітчизняне птахівництво зіткнулося з низкою серйозних економічних викликів. Зокрема, суттєво зросло кредитне навантаження на птахофабрики різного масштабу, спостерігається дефіцит розвинених каналів збуту продукції, а вартість технологічного обладнання постійно підвищується. Усі ці чинники унеможливають своєчасну модернізацію виробничих потужностей, що своєю чергою призводить до зниження продуктивності підприємств та погіршення якості готової продукції. Невідворотним наслідком стало масове припинення діяльності птахофабрик у різних регіонах країни.

Особливої актуальності в таких умовах набуває питання забезпечення ефективної інкубації, яка є критично важливою складовою сучасного птахівництва. Без належного інкубаційного обладнання неможливо досягти високих показників відтворення птиці, а отже — забезпечити стабільність виробничого циклу. Саме тому необхідно звернути увагу на тенденції, які формуються на ринку інкубаторів, та на основні аспекти їх вибору, впровадження і технічного вдосконалення.

Незважаючи на фінансово-економічні труднощі, інкубаторобудування в Україні продовжує розвиватися. Серед провідних напрямів — впровадження комп'ютеризованого моніторингу параметрів інкубації, автоматизація ключових технологічних процесів, а також розроблення нових рішень, включно з такими, що не мають аналогів за кордоном. Ці процеси характерні не лише для імпортного обладнання провідних західних виробників, але й для вітчизняних систем, що поступово зміцнюють свої позиції на внутрішньому ринку.

3.5.2. Класифікація та принцип дії

Інкубатори, які використовуються у сучасному виробництві, можуть бути як спеціалізованими — тобто розрахованими на інкубацію яєць певного виду птиці, так і універсальними, придатними для використання з яйцями різних видів. З конструктивної точки зору інкубатори поділяються на шафові та камерні. Перші монтуються з теплоізоляційних панелей і розміщуються безпосередньо у приміщеннях інкубатора, де й відбувається інкубація. Другий тип, так званий тунельний або кімнатний, передбачає використання всього приміщення як інкубаційної камери, з розміщеними по обидва боки візками з яйцями. Такий варіант ефективний у випадку великомасштабного виробництва, де інкубується понад 120 тисяч яєць одночасно.

Сучасні інкубаційні системи складаються з двох основних типів камер: передінкубаційної та вивідної. У передінкубаційній камері яйця закладаються на відповідні лотки, де здійснюється їх автоматичне обертання (наприклад, для курячих яєць — щогодини на 45 градусів). Температурний режим регулюється відповідно до типу яйця — бройлерного чи яєчного. Після завершення основного інкубаційного періоду, який для курячих яєць триває 18 діб, яйця переміщуються

до вивідної камери, де перебувають ще близько двох діб до моменту вилуплення пташенят. Для забезпечення санітарно-гігієнічної безпеки передінкубаційні та вивідні камери розміщуються в окремих приміщеннях, що є обов'язковою умовою в умовах промислового виробництва.

Оцінюючи ефективність інкубатора, ключовим показником виступає відсоток виведених пташенят. Цей параметр залежить від багатьох факторів, серед яких якість інкубаційного яйця, стан і вік батьківського поголів'я, дотримання температурного режиму та вологості протягом усього циклу. Окрему увагу необхідно приділяти розміру інкубаційної камери, оскільки зі збільшенням її об'єму зростає складність підтримання стабільних мікрокліматичних умов, що може негативно впливати на результат інкубації.

Для невеликих господарств, де критичним фактором є оптимізація витрат, допустимим варіантом є використання комбінованих інкубаційно-вивідних установок, у яких весь процес інкубації та виводу реалізується в одному корпусі. Такий підхід дозволяє зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити базовий рівень інкубаційної ефективності у фермерських умовах.

Одним із найважливіших і найвідповідальніших функціональних вузлів інкубатора є контролер — система управління, що забезпечує постійний моніторинг параметрів повітряного середовища всередині інкубаційної камери. Саме контролер відповідає за стабільність температурно-вологісного режиму та оперативне реагування у разі відхилення показників від заданих значень. У контролер надходять сигнали від датчиків температури та вологості, які встановлені безпосередньо всередині камери. Для забезпечення однорідного мікроклімату застосовується система вентиляції, яка за рахунок циркуляції повітря сприяє вирівнюванню температури та вологості у всьому об'ємі інкубатора. Окрім того, ця система запобігає перенасиченню повітря вуглекислим газом, забезпечуючи його відведення з камери.

Підтримання заданої температури інкубації реалізується за допомогою електронагрівального елемента (ТЕНу), а для охолодження використовується радіатор із холодною водою. Таким чином, створюється динамічно керований мікроклімат, необхідний для повноцінного розвитку ембріонів.

Інкубатори поділяються на барабанного та тележкового типу. Згідно з висновками науковців, конструкція барабанних інкубаторів не дозволяє забезпечити рівномірний розподіл тепла та вологості по всьому об'єму камери. Це ускладнює тепло- та масообмін і знижує ефективність інкубації, що проявляється у низькому відсотку виведення пташенят. До того ж, експлуатація таких інкубаторів є трудомісткою, оскільки потребує додаткового перекладання яєць, що робить їх економічно не вигідними. На сучасному етапі барабанні конструкції майже повністю вийшли з використання.

Натомість перевага надається тележковим (стелажним) інкубаторам, у яких яйця розміщуються в лотках, встановлених на пересувних візках. Такий підхід є більш зручним в експлуатації, дозволяє досягти кращих аеродинамічних характеристик камери, забезпечує легкий доступ до інкубаційного матеріалу та

сприяє високому рівню контролю за технологічним процесом, що в підсумку забезпечує стабільно високий відсоток виведених пташенят.

Залежно від способу завантаження яєць інкубаційний процес може здійснюватися за одноступеневою або багатоступеневою (конвеєрною) схемою. У першому випадку вся партія яєць закладається одночасно, що дозволяє чітко дотримуватися технологічних параметрів. Багатоступенева схема передбачає поступове додавання нових партій яєць у вже працюючу інкубаційну камеру, що підвищує гнучкість у плануванні виробництва, однак ускладнює підтримання сталих умов інкубації для всіх партій одночасно.

3.5.3. Схеми завантаження

Серед ключових технологічних рішень в інкубації яєць важливе місце посідає вибір між одноступеневою та багатоступеневою схемами завантаження. Для повноцінного розвитку ембріона всередині яйця необхідно забезпечити оптимальні умови, включаючи стабільну температуру, вологість повітря, газообмін та регулярне обертання. У класичному варіанті багатоступеневої інкубації камера поступово заповнюється партіями яєць, тож всередині одночасно перебувають ембріони на різних етапах розвитку.

З одного боку, така схема дозволяє економити енергоресурси. У міру дозрівання ембріонів зростає обсяг тепла, яке вони виділяють, і це тепло частково використовується для обігріву новіших партій яєць завдяки циркуляції повітря. Водночас більш зрілі яйця природно охолоджуються, що теж відповідає фізіологічним вимогам. Проте з іншого боку, недоліком багатоступеневої інкубації є неможливість адаптації режиму під потреби кожного вікового шару. Температурно-вологісні умови є спільними як для тільки закладених, так і для готових до перенесення у вивідну камеру яєць. Крім того, складнішим стає процес санітарної обробки обладнання, оскільки інкубатор практично ніколи не буває повністю порожнім. Це створює загрозу накопичення патогенної мікрофлори, що може спричинити зараження ембріонів.

Одноступенева інкубація забезпечує значно вищу виводимість і якість молодняку. Якщо раніше рівень виведення складав 60–70 %, то за новою технологією він досягає 90 % і навіть більше. Однією з головних переваг цього підходу є можливість повного очищення та дезінфекції інкубатора після кожного виробничого циклу, що істотно знижує ризики інфекційного ураження ембріонів.

Технологія одноступеневої інкубації передбачає одночасне завантаження до камери яєць однакового віку. Весь процес повністю орієнтований на потреби ембріона впродовж усіх стадій його розвитку: здійснюється динамічне регулювання температури, вологості та вентиляції відповідно до поточних фаз розвитку. Натомість головним недоліком багатоступеневої системи є підвищена ймовірність інфікування яєць різних вікових груп спорами бактерій та грибків, що знижує життєздатність виведених пташенят, підвищує рівень відбраковки, падежу і створює ризики для безпечності м'ясної продукції. Усе це, зрештою, обертається для господарства суттєвими фінансовими втратами.

З огляду на сучасні досягнення у генетиці та інтенсивні технології вирощування, нові породи птиці потребують максимально точного контролю інкубаційних параметрів. Забезпечити це повною мірою можливо лише за умов одноступеневого підходу. Саме тому така система дедалі частіше впроваджується при модернізації інкубаторних господарств, особливо під час заміни застарілого обладнання. Проте цей перехід вимагає додаткового навчання персоналу, адже алгоритм управління в одноступневих інкубаторах істотно відрізняється від багатоступневих і передбачає глибше розуміння фізіології ембріонального розвитку.

Під час закладання інкубаційного матеріалу необхідно суворо дотримуватися технологічних вимог: не слід змішувати яйця з різних партій, а якщо це неминуче — матеріал повинен бути максимально однорідним за породою, віком батьківського стада (не більше п'яти тижнів різниці) та терміном зберігання яєць (не більш як п'ять діб).

Пташенята, виведені в умовах одноступеневої інкубації, демонструють кращі показники збереженості та приросту живої маси. Водночас, у фінансово-економічному вимірі ця технологія є дорожчою: вона потребує більшого простору для інкубаторію, додаткових інвестицій у обладнання та вищих експлуатаційних витрат, зокрема споживання електроенергії. З огляду на це, більшість провідних виробників пропонують на ринку інкубатори обох типів. Універсальної відповіді на запитання, яка з технологій є кращою, наразі не існує — вибір залежить від масштабів виробництва, бюджету, цілей господарства та рівня підготовки персоналу.

3.5.4. Вимоги до приміщень для розміщення інкубаційного обладнання та практичні аспекти вибору техніки

До приміщень, у яких розміщується інкубаційне обладнання, висувається низка обов'язкових санітарно-технічних вимог. Оптимальна температура в робочому середовищі має становити близько 20 °С. Приміщення повинно бути оснащено припливно-витяжною вентиляцією з висотою повітряного потоку не менше 3 метрів для промислових підприємств і не менше 2,5 метра для фермерських господарств. Обов'язковою умовою також є наявність окремих залів для попереднього сортування та тимчасового зберігання яєць упродовж п'яти діб перед закладанням їх в інкубатор. Покриття підлоги має бути бетонним з відповідним ухилом для забезпечення ефективного відведення води під час санітарної обробки.

Українські та російські виробники і користувачі інкубаційного обладнання здебільшого йдуть двома шляхами: або будують спеціалізовані інкубаторні приміщення з нуля — що найчастіше диктується вимогами імпортової техніки, — або здійснюють реконструкцію наявних будівель, які залишилися у спадок ще з радянських часів. У разі придбання обладнання зарубіжного виробництва необхідно заздалегідь уточнити у постачальника технічні вимоги до габаритів приміщення, інфраструктури та допоміжних систем.

Барабанний тип інкубатора в сучасних умовах вважається морально застарілим. Він є менш зручним в обслуговуванні, має суттєві обмеження щодо тепломасообміну і вимагає додаткових трудових витрат, зокрема під час обертання і перекладання яєць. Саме тому більшість виробників сьогодні зосереджуються на інкубаторах тележкового типу. Однією з важливих характеристик обладнання, на яку слід звернути увагу при його виборі, є конструкція дверей. У традиційних моделях вони мають розпашну форму або виконані у вигляді штор, що ускладнює процес завантаження й розвантаження візків. Натомість сучасні конструкції оснащуються підйомним механізмом, який дозволяє підняти двері до стелі одним натисканням кнопки, що значно полегшує експлуатацію.

Не менш важливим є вибір матеріалів, з яких виготовлено інкубатор. В умовах частого використання гарячої води, пари та дезінфекційних засобів корпус обладнання повинен бути стійким до корозії та біологічного руйнування. Найбільш ефективними вважаються моделі з нержавіючої сталі та полікарбонату. Вони зберігають механічну й термічну стабільність навіть під дією агресивного середовища. Менш надійними є корпуси, виготовлені з оцинкованої сталі з прошарком теплоізоляційного матеріалу — з часом оцинковка може піддаватися корозії, а ізоляційний шар вбирає вологу й втрачає свої теплоізоляційні властивості.

З міркувань безпеки електропроводка інкубатора має бути змонтована зовні інкубаційної камери, що дозволяє уникнути коротких замикань та полегшує обслуговування систем.

При виборі інкубатора споживачі орієнтуються насамперед на обсяги виведення, вид птиці та цінову категорію обладнання. Одним із критичних параметрів є спосіб обертання яєць. Існують три основні варіанти: ручний, при якому камера відкривається, що порушує мікроклімат; механічний, де перевертання здійснюється одночасно для всіх яєць в одному лотку за допомогою важеля; та автоматичний, що не потребує ручного втручання. Крім того, ефективність інкубаційного процесу значною мірою залежить від здатності обладнання підтримувати оптимальні мікрокліматичні умови — стабільну температуру, контроль вологості та ефективну вентиляцію.

Таким чином, вибір інкубатора є багатофакторним завданням, що потребує комплексного підходу з урахуванням виробничих, санітарно-технічних, економічних та біологічних критеріїв.

Інкубаційне обладнання має бути надійним, простим в експлуатації та зрозумілим для обслуговуючого персоналу з різним рівнем професійної підготовки. Бажано, щоб інкубаційна камера була універсальною та підходила для різних видів птиці. При цьому слід враховувати, що страусине яйце може бути у 100 разів важчим за перепелине, і якщо для останнього необхідне зволоження повітря, то для першого — його осушення. За обсягом завантаження інкубатори поділяють на побутові (до 500 яєць), фермерські (від 800 до 15 000 яєць) та промислові (понад 15 000 яєць). Побутові інкубатори зазвичай використовуються для потреб особистого господарства, реалізація пташенят

обмежується родинним або сусідським колом і не потребує найму персоналу. Фермерські установки вже передбачають закупівлю інкубаційного яйця, продаж пташенят на ринку, а контроль за процесом здійснюють власники господарств або наймані працівники. Промислові комплекси функціонують у режимі безперервного циклу з цілодобовим моніторингом інкубаційного процесу та високим рівнем відповідальності за результати.

Основна вимога до сучасного інкубатора — це повна автоматизація управління та контролю параметрів середовища, що забезпечує стабільно високий відсоток виведення незалежно від зовнішніх умов або виду птиці. Автоматизація також компенсує дефіцит кваліфікованих кадрів у галузі: сьогодні фахівців інкубаторної справи бракує. Найважливішим параметром, який має бути під постійним контролем, є підтримання необхідної температури, вологості та газового складу повітря у камері. Для цього було розроблено інноваційну технологію, яка базується на розрахунку параметрів повітрообміну залежно від величини метаболічного тепла — енергії, яку виділяє ембріон у процесі свого розвитку. Це тепло відображає фізіологічний стан ембріона та його реакцію на зовнішні умови, включаючи температуру, вологість тощо. На основі цих даних система автоматично регулює вміст кисню в повітрі за допомогою повітряних заслінок, адаптує швидкість руху повітряних мас у камері відповідно до потреб ембріонів на різних етапах розвитку, а також керує температурою й вологістю без необхідності постійного використання систем радіаторного охолодження. Такий підхід забезпечує високу рівномірність температурного режиму, що особливо важливо для продуктивності. Середній рівень інкубаційного браку на обладнанні місткістю 16 тис. яєць не перевищує 4 %.

Поширеною проблемою у роботі інкубаторів є нерівномірність температури всередині камери — як локальне перегрівання, так і недогрів — що негативно впливає на загальний відсоток виведення пташенят. Нерівномірність температурного режиму посилюється через власне тепловиділення ембріонів на пізніх стадіях розвитку, особливо у випадку з бройлерами, водоплавною птицею та індиками. Ця проблема була вирішена в сучасних моделях завдяки оптимальній аеродинаміці та продуманій системі повітряного охолодження. Важливими критеріями вибору інкубатора залишаються також енергоефективність, наявність автоматичної системи перевертання яєць. За відсутності такої автоматики обертання доводиться здійснювати вручну, відкриваючи дверцята інкубаційної камери, що порушує стабільність мікроклімату й може негативно вплинути на ембріони. У сучасних моделях ця функція не лише автоматизована, а й продубльована можливістю здійснення обертання за допомогою зовнішнього механічного штурвалу без відкриття камери.

Головним критерієм при виборі промислового інкубатора є саме відсоток виведення. Надійність, економічність і навіть низька вартість не компенсують втрати, якщо вивід не перевищує, скажімо, 70 %. Навіть з урахуванням якості інкубаційного яйця технічні характеристики обладнання є критичними. У сучасних промислових інкубаторах використовується інноваційна кругова

система повітрообміну, яка забезпечує значну економію електроенергії (до чотириразового зниження споживання), покращену продувність та ефективну зміну повітря в камері. На відміну від традиційного реверсивного руху повітряних мас, така система гарантує стабільні умови для розвитку ембріонів протягом усього циклу інкубації.

3.5.5 Динаміка попиту на інкубаційне обладнання та ринкові тенденції

Попит на інкубаційне обладнання в більшості випадків має виражений сезонний характер: його пік припадає на період з вересня по січень. Саме в цей час птахівничі підприємства прагнуть завершити оновлення або модернізацію обладнання, щоб навесні мати вже виведене поголів'я для реалізації. Саме в цей період укладається основна частина контрактів.

Загалом ринок інкубаторів для малих фермерських господарств є достатньо насиченим. Наявне співвідношення ціни та функціональних характеристик дозволяє підібрати модель, що відповідатиме специфічним потребам господарства. Водночас масштабне оновлення інкубаційної техніки потребує значних капіталовкладень і є недоступним для більшості малих і середніх виробників. У поточному році спостерігається певне зниження попиту, що пов'язано з нестабільною фінансово-економічною ситуацією в секторі малого бізнесу.

Загальний стан птахівничої галузі є складним: зростає кількість банкрутств, закриваються птахофабрики, а їхні виробничі приміщення та обладнання, зокрема інкубатори, розпродуються. На вторинному ринку доступна значна кількість техніки у задовільному робочому стані за цінами, значно нижчими від вартості нових установок. Це спричиняє зниження попиту на нове обладнання, оскільки підприємства часто віддають перевагу придбанню вживаних, але повністю функціональних машин, що дозволяє зменшити інвестиційне навантаження.

Попит на промислове інкубаційне обладнання впродовж останнього десятиріччя залишається низьким. Більшість інкубаторіїв були збудовані у 1965–1989 роках, і питання оновлення застарілої техніки вже давно потребує нагального вирішення. Проте замість впровадження сучасних технологій автоматизації, багато підприємств продовжують експлуатувати старе обладнання, здійснюючи лише часткову його реставрацію і залучаючи персонал без належної кваліфікації.

Раніше зростання попиту фіксувалося переважно навесні, однак сьогодні тенденція до сезонності майже зникла. Найшвидше приймають рішення щодо закупівлі інкубаторів саме малі фермерські господарства. Великі птахофабрики, як правило, проходять тривалий процес внутрішнього узгодження і розробки фінансової моделі закупівлі.

3.5.6 Надійність інкубаційного процесу та економічна доцільність власного інкубаторію. Інкубація є надзвичайно відповідальним технологічним процесом, оскільки яйце, як живий біологічний об'єкт, є чутливим до найменших

коливань температури та вологості. Навіть короткочасне зупинення системи може призвести до загибелі закладки. У випадку промислових установок, розрахованих на десятки тисяч яєць, фінансові втрати підприємства можуть бути критичними. Саме тому великі птахофабрики, орієнтовані на безперебійне виробництво, обов'язково мають резервні інкубатори. У разі аварійної ситуації це дає змогу оперативно перемістити лотки з яйцями до резервної камери, що забезпечує збереження інкубаційного циклу та дозволяє спокійно провести технічне обслуговування основного обладнання.

На відміну від великих агропідприємств, фермерські господарства рідко мають можливість утримувати резервні інкубатори в постійній експлуатації. Тому для забезпечення надійності інкубації розроблено власні електронні та механічні компоненти, ключові функції яких продубльовані. Усі елементи конструкції пройшли багаторічні випробування, зокрема за участю науково-дослідних установ, таких як НДІ птахівництва. Особливу небезпеку для ембріонального розвитку становить відмова терморегулятора. Якщо нагрівальний елемент працює безконтрольно, яйце може втратити життєздатність уже протягом 30–40 хвилин. Для уникнення цього всі терморегулятори інкубаторів оснащені системами захисту від перегріву: у разі критичної ситуації нагрів автоматично відключається, вмикається охолодження та спрацьовує сигналізація. Фермерські моделі додатково обладнуються подвійною системою терморегуляції, що дозволяє тимчасово працювати навіть у разі відмови одного з вузлів без суттєвого зниження відсотка виведення.

Регулювання вологості повітря в таких установках може здійснюватися як в автоматичному, так і в ручному режимі, що підвищує гнучкість управління процесом. Для стабільного функціонування інкубаційної системи, з урахуванням необхідності технологічних зупинок на профілактику та дезінфекцію, доцільно мати кілька інкубаторів. Повне очищення та зупинка обладнання з метою профілактики мають проводитися щонайменше раз на рік протягом семиденного періоду.

Питання доцільності створення власного інкубаторію залишається відкритим і потребує індивідуального економічного обґрунтування. Одні фахівці стверджують, що наявність власного інкубатора дозволяє здійснювати повний контроль якості молодняка, оскільки саме умови інкубації мають істотний вплив на здоров'я пташенят. Придбання молодняка ззовні не дає гарантії його якості: завжди існує ризик пошкодження під час транспортування або прихованих інфекцій. Тому наявність власного інкубатора може бути виправданою навіть для невеликих господарств, за умови стабільного попиту на молодняк.

З іншого боку, отримання високоякісних пташенят безпосередньо залежить від якості інкубаційного яйця, яке має надходити від високопродуктивного племінного стада. На жаль, в Україні та країнах пострадянського простору функціонує обмежена кількість племінних господарств, що значно знижує доступність якісного інкубаційного матеріалу. У зв'язку з цим частина птахофабрик змушена закуповувати інкубаційні яйця або пташенят за кордоном. Слабка реалізація програм імпортозаміщення та

обмежена державна підтримка галузі зумовлюють збереження критичної залежності від іноземних постачальників.

Таким чином, придбання інкубаційного обладнання найбільш виправдане для господарств, які займаються племінною роботою. Їхня продукція — як інкубаційне яйце, так і виведений молодняк — стабільно користується попитом на ринку, а інвестиції в інкубаційне обладнання забезпечують високу рентабельність навіть в умовах нестабільної економічної ситуації.

3.6 ВПЛИВ РЕЖИМУ ОСВІТЛЕННЯ НА ЕКОНОМІЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ПТАХІВНИЦТВА

Проблема енергозбереження сьогодні має глобальне значення і гостро стоїть перед Україною. З розвитком виробничих сил зростає частка споживання електроенергії на освітлення в усіх сферах господарської діяльності. Обмеженість енергетичних ресурсів і їх неефективне використання призводить до швидкого виснаження запасів, що може спричинити енергетичну кризу не лише на рівні окремої країни, а й у глобальній системі.

Хоча в відносних показниках витрати електроенергії на освітлення в окремих сільськогосподарських підприємствах та галузях агропромислового комплексу (АПК) України можуть здаватися незначними, у абсолютних цифрах вони становлять суттєву величину. Це підкреслює актуальність впровадження ефективних енергозберігаючих технологій.

Метою цього розділу є обґрунтування необхідності застосування енергозберігаючих рішень в агропромисловому комплексі України на прикладі промислового птахівництва, яке є однією з найдинамічніших галузей сільського господарства та суттєво впливає на продовольчу безпеку країни.

Природне освітлення є найбільш сприятливим для розвитку живих організмів і всіх сфер господарювання. Біоритми птиці у природних умовах залежать від сезонних змін тривалості світлового дня. Однак сучасне промислове птахівництво в Україні змінило традиційні умови утримання птиці: пташники, як правило, будують без вікон, що позбавляє птицю доступу до природного світла, а з раннього віку переводять у кліткові умови з високою щільністю посадки. Такий підхід дозволяє концентрувати пташині клітки на обмежених площах та забезпечувати стабільний рівень продукції протягом року.

Особливо важливим є регулювання освітлення у пташниках для курей, зокрема яєчного напрямку. Маніпуляції з режимом освітлення дозволяють оптимізувати фізіологічний розвиток птиці, створювати комфортні умови утримання та суттєво підвищувати продуктивність. Таким чином, розвиток промислового птахівництва в Україні має базуватися на впровадженні енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій.

Наукові дослідження і практичні напрацювання в галузі пропонують широкий спектр енергозберігаючих рішень, проте більшість з них орієнтовані на продуктивні показники птиці, які безпосередньо пов'язані з її фізіологічними ритмами.

З економічної точки зору впровадження енергозберігаючих технологій у виробництво повинно базуватися на аналізі фінансових результатів птахівничих підприємств України та співвідношенні їх з показниками продуктивності птиці.

Для підвищення економічної ефективності яєчного птахівництва необхідно правильно підібрати та грамотно запрограмувати енергозберігаючу технологію, враховуючи специфіку умов конкретного птахівничого господарства.

Проведено аналіз шести різних режимів освітлення на прикладі типових птахівничих господарств (умови режимів представлені на **рис. 3.6.1**).

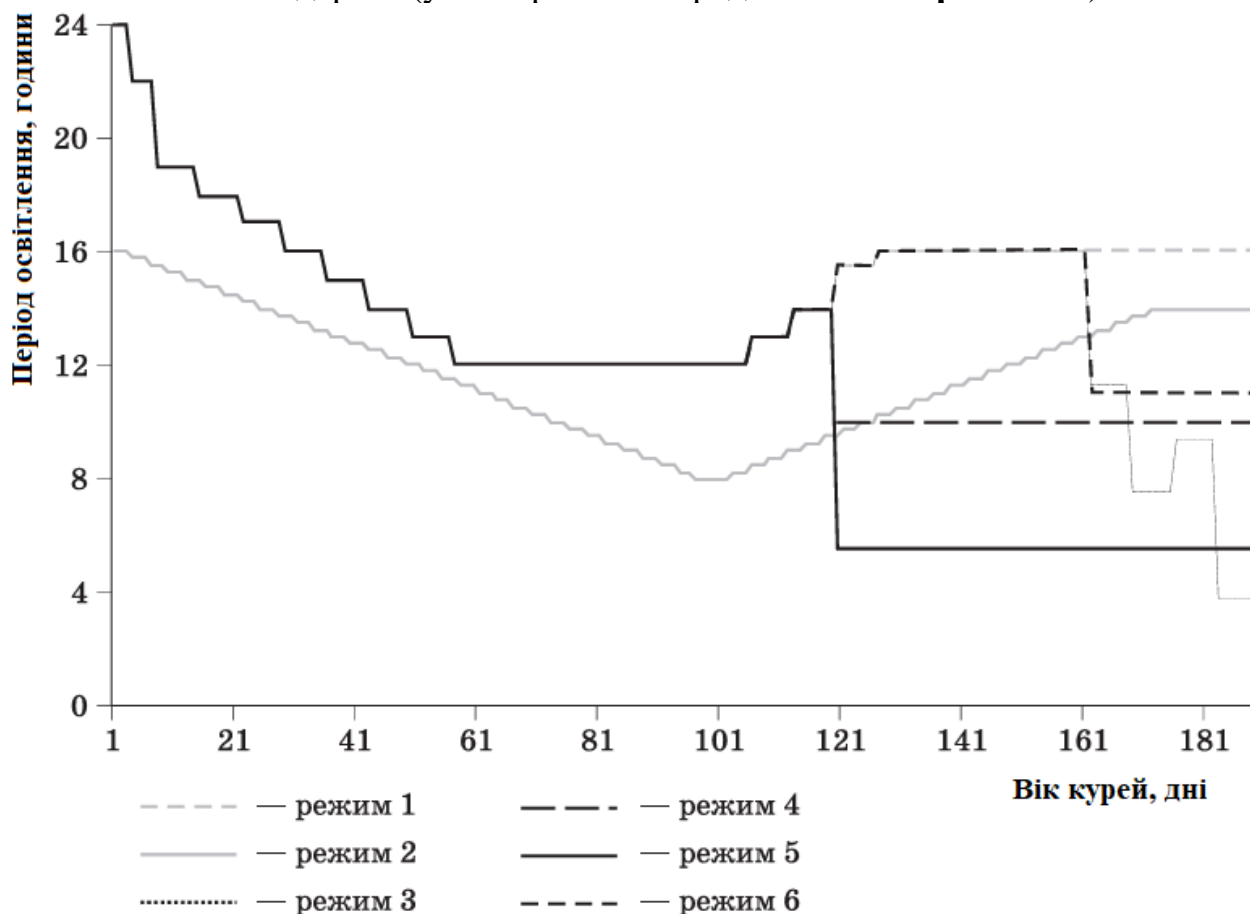


Рис. 3.6.1 Умови застосування досліджуваних енергозберігаючих технологій (світлових режимів) при вирощуванні курей яєчного напрямку

У якості базового режиму освітлення (енергозберігаюча технологія 1) застосовується наступна схема: у віці 1–3 дні освітлення триває 24 години, з 4 по 7 день – 22 години світла, у віці 8–14 днів – 19 годин, а надалі щотижня тривалість світлового періоду скорочується на 1 годину, що призводить до співвідношення 12 годин світла і 12 годин темряви у 57 днів. Цей режим зберігається до 106 днів, після чого тривалість освітлення поступово збільшують: двічі на 1 годину, потім на 1,5 години і на 30 хвилин. У підсумку до 127 дня режим становить 16 годин світла та 8 годин темряви і надалі залишається незмінним.

Другий варіант енергозберігаючої технології передбачає, що молодняк вирощують при режимі освітлення 16 годин світла і 8 годин темряви з першого

дня. При цьому тривалість світлового періоду регулярно скорочується кожні 3 дні на 15 хвилин. До 100 дня співвідношення світла і темряви стає 8:16, після чого тривалість світлового періоду збільшують щоквартально до 12 годин до 150 дня і до 14 годин до 172 дня, де режим залишається стабільним до кінця експлуатації.

Третя технологія (програма Bio-Mittent™), розроблена вченими *Корнуельського та Редінгського університетів*, полягає у використанні 15-годинного світлового дня з короткими перервами темряви в кожній годині світла. Такий режим сприяє зниженню енергозатрат та покращенню процесу годівлі. В дослідженні цей режим застосовувався з 23 тижня віку курей-несучок, враховуючи, що до цього птицю вирощували за базовим світловим режимом.

Четверта енергозберігаюча технологія, розроблена співробітниками *Бристольського університету*, базується на преривчастому освітленні за схемою 2 години світла : 4 години темряви : 8 годин світла : 10 годин темряви. Даний режим використовується з 18 тижня віку ремонтного молодняка, а до 18 тижнів птицю утримують за базовим світловим режимом.

Енергозберігаюча технологія 5 передбачає застосування з 18-тижневого віку курочок і півників преривчастого освітлення за схемою 2С : 4Т : 2С : 8Т : 1,5С : 6,5Т. До цього віку вирощування здійснюється за базовим світловим режимом.

Енергозберігаюча технологія 6 передбачає використання базового світлового режиму з 1-го дня до 161 дня, після чого тривалість світлових періодів поступово зменшується з 14 до 11 годин за схемою 2С : 3Т : 9С : 10Т.

Результати проведеного аналізу узагальнені у робочій таблиці 3.6.1. Дані цієї таблиці свідчать, що найбільша вартість валового збору була зафіксована при застосуванні світлового режиму 2. Крім того, витрати на освітлення пташника при цьому режимі на 27 тис. грн менші, ніж при базовому режимі 1. Найнижчі витрати на освітлення спостерігалися при використанні режимів під номерами 3 і 5.

Таблиця 3.6.1. Показники ефективності рекомендованих показників освітлення

Показники	Група					
	1	2	3	4	5	6
Вартість валового збору яєць, тис. грн	8115	8625	764 4	7699,5	6370	5816
Додаткові витрати на контроль, тис. грн	-	230,5	213	187,5	- 789,5	-1040
Загальні витрати на виробництво валового збору, тис. грн	5028,5	5195,5	446 0	4355	3485	3089,5
У тому числі витрати на освітлення, тис. грн	173,5	146,5	78	112,5	75,5	130
Прибуток від реалізації валового збору яєць, тис. грн	8115	8625	764 4	7699,5	6370	5816
Рентабельність продажів, %	38	39	41	43	45	46

Додатково проведено аналіз точки беззбитковості (таблиця 3.6.2), за умов однакових умовно-постійних витрат для всіх шести режимів. Результати показали, що найбільший обсяг виробництва яєць понад рівень беззбитковості, тобто той обсяг, при якому підприємство покриває постійні витрати і починає отримувати прибуток з кожної додаткової одиниці продукції, був досягнутий при використанні режиму 2 — 5 тис. грн.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що найбільш економічно ефективним для яєчного птахівництва слід вважати світловий режим № 2, який рекомендується до впровадження на птахофабриках регіону.

Таблиця 3.6.2 Аналіз точки беззбитковості

Показники	Група					
	1	2	3	4	5	6
Витрати на виробництво валового збору загалом, млн. грн:	5029	5196	4460	4355	3485	3089
Умовно змінні витрати на весь обсяг виробництва, тис грн,	3979	4146	3410	3305	2435	2039
Умовно постійні витрати, грн,	105000 0	10500 00	10500 00	10500 00	1050000	1050000
Ціна одиниці продукції, грн,	1,105	1,105	1,105	1,105	1,105	1,105
Умовно змінні витрати на одиницю продукції, грн,	0,685	0,665	0,645	0,625	0,605	0,585
Точка беззбитковості, шт.,	124925 7	11949 56	11406 10	10937 38	1049038	1013419
Обсяг виробництва понад точку беззбитковості, грн,	276085 7	26408 52	25207 48	24171 60	2318373	2239655
Обсяг виробництва понад точку беззбитковості, шт.,	242276 6	27077 91	23183 60	23902 98	1833438	1618407
Прибуток від реалізації валового збору яєць, тис. грн.	535431 3	59842 17	51235 76	52825 58	4051898	3576679

Режими під номерами 5 і 6 більше підходять для утримання промислових стад курей-несучок. Однак їх застосування в сучасних умовах можливе лише при додаткових фінансових затратах, оскільки вони вимагають більш плавної зміни «світло/темрява» та використання спеціального обладнання.

Для оптимізації системи освітлення та зниження енергоспоживання доцільно використовувати сучасні високотехнологічні автоматизовані системи, які програмуються на автоматичне вмикання та вимикання освітлення відповідно до заданої програми. Контролери таких систем імітують природні цикли сходу та заходу сонця, світлий та темний час доби. Проте варто зазначити, що подібна автоматика має високу вартість.

Додатково розглянуто запас конкурентоспроможності продукції птахофабрики для базового режиму 1 і вибраної експериментальної енергозберігаючої технології 2, визначено, який період часу птахівництво може існувати без зміни продажної ціни на продукцію. При цьому ключовим фактором

конкурентоспроможності вважається собівартість одиниці продукції. За існуючих умов господарювання прийнято ціновий мінімум у 2,21 грн/шт (станом на 2013 рік).

Розрахунки проведено за умови сталого поголів'я курей-несучок та постійної ціни одиниці продукції, при середньорічному темпі інфляції 10,5 %, що передбачає щорічне зростання виробничих витрат на цей відсоток.

Таким чином, для сучасних умов утримання племінного стада курей-несучок доцільно рекомендувати застосування світлового режиму № 2. Цей режим забезпечує достатню масу отриманих яєць для інкубації та отримання життєздатного потомства, при цьому оптимізуючи енергоспоживання та економічні показники..

3.7 МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ В ПТАХІВНИЦТВІ

Освітлення відіграє надзвичайно важливу роль при вирощуванні бройлерів, адже дозволяє керувати фізіологічними процесами розвитку птиці, створювати комфортні умови утримання та забезпечувати високу продуктивність стада. Правильно підібрана система освітлення сприяє зниженню падежу молодняка, зменшенню витрат кормів і підвищенню їх засвоюваності, а також дає змогу значно зекономити електроенергію.

Згідно з нормативами, освітленість у пташниках має становити не менше ніж 25 лк — саме така яскравість забезпечує птахам можливість безперешкодно знаходити корм і воду. Через кілька днів після початку вирощування, коли птиця звикає до системи годівлі та поїння, інтенсивність освітлення можна поступово зменшувати до мінімального рівня — близько 5 лк.

При виборі джерел освітлення слід враховувати низку параметрів, зокрема — пульсацію світлового потоку. Цей показник може значно відрізнятись залежно від типу лампи та терміну її експлуатації. Згідно з дослідженнями, лампи з частотою пульсації понад 26 000 Гц не чинять негативного впливу на зір птиці, оскільки частота виходить за межі її сприйняття.

Сучасні світлодіодні (LED) лампи — це енергоощадні світлотехнічні пристрої високої яскравості, які мають низку очевидних переваг:

- низьке споживання електроенергії (до 90 % менше порівняно зі звичайними лампами розжарювання);
- тривалий термін служби (не менше 100 000 годин);
- висока стійкість до механічних впливів (ударів, вібрацій);
- відсутність мерехтіння завдяки частоті понад 26 000 Гц.

Було проведено експериментальне порівняння ефективності існуючої системи освітлення типу Gasolec із сучасною LED-системою. Птах у пташнику вирощувався у п'ятизальних корпусах. Один із досліджуваних залів мав розміри: довжина — 42 м, ширина — 24 м, висота — 4 м.

Для порівняння було встановлено дві системи освітлення:

- 7 рядів ламп Gasolec потужністю по 11 Вт, розташованих через кожні 3 метри;

- 3 ряди світлодіодних світильників потужністю 8 Вт кожен, по 8 світильників у ряду, з міжламповою відстанню 5 м (рис. 3.7.1).

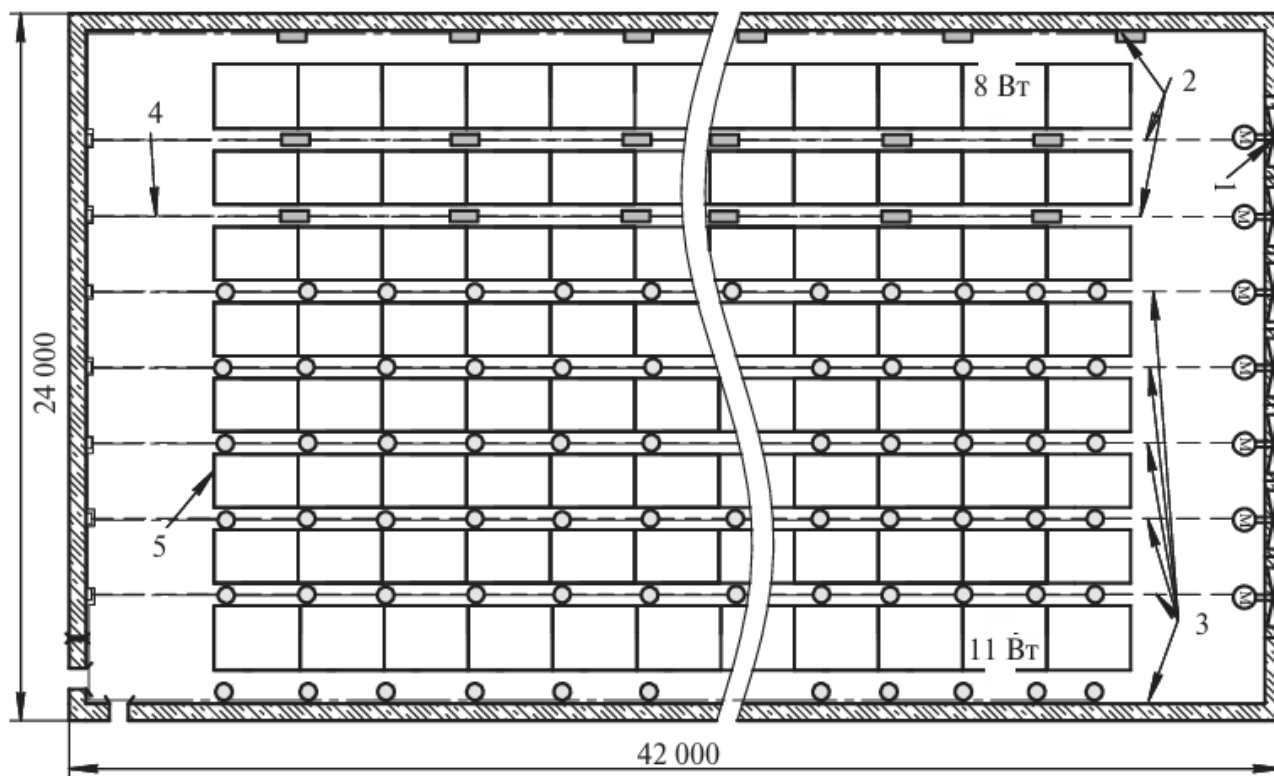


Рис. 3.7.1 Схема розташування систем освітлення у пташнику. Де: 1 — вентилятори; 2 — світлодіодна система освітлення (1–3 батареї); 3 — система освітлення Gasolec; 4 — прокладка електропроводки та кріплення світильників здійснюється на тросі; 5 — батареї для утримання бройлерів.

У ході порівняльних випробувань у виробничих умовах було виявлено низку переваг світлодіодного освітлення порівняно з традиційною системою Gasolec, що використовується на багатьох вітчизняних підприємствах.

Основні переваги світлодіодної системи:

Енергозбереження. Упродовж дослідного періоду загальне енергоспоживання світильників Gasolec становило 28,3 кВт, тоді як світлодіодні лампи спожили лише 9,7 кВт. Отже, перехід на світлодіодне освітлення дозволив зменшити витрати електроенергії втричі, що є суттєвим фактором економії в умовах зростання енергетичних тарифів.

Прискорене зростання живої маси птиці. Спостереження за динамікою росту бройлерів засвідчили, що під дією світлодіодного освітлення приріст живої маси був вищим, ніж у групі з лампами Gasolec (таблиця 3.7.1). Це свідчить про позитивний вплив якісного світлового середовища на обмін речовин та загальне фізіологічне здоров'я птиці.

Таким чином світлодіодне освітлення забезпечує тривалу економію ресурсів за рахунок зниженого споживання електроенергії, підвищеного терміну служби ламп і зменшення потреби в технічному обслуговуванні.

Таблиця 3.7.1. Динаміка росту бройлерів

Дні	Gasolec (5 рядів)	Світлодіоди (2 ряди)	Норма
14	388	370	420
21	728	760	750
28	1150	1222	1200
35	1690	1728	1660
40	1872	1923	2100

Поліпшення зоотехнічних показників, зокрема швидшого приросту живої маси бройлерів, що напряму впливає на прибутковість господарства.

Отримані результати підтверджують доцільність подальших досліджень та ширшого впровадження світлодіодного освітлення в промисловому птахівництві, зокрема для вирощування бройлерів.

Рекомендована література (пташники)

- *Uğur Özentürk, Zhengqi Chen, Lorenzo Jamone, Elisabetta Versace (2024) "Robotics for poultry farming: Challenges and opportunities", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 226, 109411, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109411> .*
- *Xin He, Hao Xue, Yuchen Jia, Zongkui Xie, Lihua Li (2025) "Progress and trends of non-contact detection methods for poultry growth information: A review", Poultry Science, Vol. 104, Iss. 9, 105281, <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105281>*
- *Juliana de Souza Granja Barros, Tarcio André dos Santos Barros, Flávio José de Oliveira Morais, Karina Sartor, Luiz Antonio Rossi (2020) "Proposal of LED-based linear lighting systems with low power consumption and high light distribution for laying hens", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 169, 105218, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105218>.*
- *Agnieszka Ludwiczak, Patryk Sztandarski, Joanna Składanowska-Baryza, Karolina Szulc, Gabriela Cieleń, Aneta Jaszczyk, Magdalena Solka, Grzegorz Pogorzelski, Jarosław O. Horbańczuk, Joanna Marchewka, Ewa Sell-Kubiak (2025) "Role of extensification strategies in chicken meat quality", Poultry Science, Vol. 104, Iss. 11, 105717, <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105717>.*

Питання для самоперевірки (пташники)

- Які основні технологічні процеси у птахівництві зазвичай автоматизуються?
- Які країни досягли найбільшого прогресу у впровадженні робототехніки в птахівництві?
- Які головні виклики стоять перед впровадженням роботів у пташниках?
- Які можливості відкриває роботизація для підвищення ефективності та добробуту птиці?
- Які безконтактні технології найбільш поширені для моніторингу росту птиці?

- У чому перевага безконтактних методів порівняно з традиційними способами вимірювання?
- Які обмеження можуть виникати при використанні комп'ютерного зору у птахівництві?
- Які параметри мікроклімату є ключовими для продуктивності птиці взимку?
- Чому регулювання температури повітря у пташнику в зимовий період є особливо складним завданням?
- Як покращення системи автоматичного регулювання впливає на енергоефективність виробництва?
- Чому контроль аміаку в пташниках є критично важливим?
- Які сенсори та методи найчастіше застосовуються для моніторингу концентрації аміаку?
- Які технологічні інновації останніх років впроваджені в інкубатори?
- Як автоматизація інкубаційних процесів впливає на виводимість пташенят?
- У яких напрямках розвивається інкубаційне обладнання для підвищення біобезпеки?
- Які параметри освітлення (інтенсивність, тривалість, спектр) впливають на продуктивність птиці?
- Як режим освітлення пов'язаний із кормоспоживанням та конверсією корму?
- Чому економічна ефективність у птахівництві залежить від оптимального освітлення?
- Які спектри світлодіодного освітлення найбільш ефективні для різних видів птиці?
- Як LED-освітлення сприяє зниженню енергоспоживання у птахівництві?
- Які виклики існують у впровадженні LED-технологій у промислові пташники?
- які сучасні сенсорні технології використовуються для моніторингу стану птиці та мікроклімату в пташниках?
- У чому переваги використання систем комп'ютерного зору для відстеження поведінки та здоров'я птиці?
- Як застосування технологій Інтернету речей (IoT) змінює управління пташниками?
- Які інноваційні рішення в автоматизованих системах годування дозволяють зменшити втрати корму?
- Які приклади роботизованих систем прибирання та дезінфекції пташників вже впроваджені на практиці?
- Як штучний інтелект (AI) може допомагати у прогнозуванні продуктивності птиці?
- Як великі дані (Big Data) використовуються для оптимізації роботи пташників?
- Які головні виклики постають при впровадженні роботизованих систем у птахівництві?

ТЕМА 4. СВІТОВИЙ ДОСВІД АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ВИРОБНИЦТВ В СПОРУДАХ ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ

4.1 ЗАСТОСУВАННЯ РОСЛИННИХ ФАБРИК ЗІ ШТУЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ У САДІВНИЦТВІ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

4.1.1 Вступ. Садівництво, як важливий складник сільського господарства, зазнало значної еволюції протягом історії людства. Садівничі культури — зокрема овочі, фрукти, прянощі, квіти та декоративні рослини — вирощуються в усьому світі завдяки своїм привабливим зовнішнім характеристикам (розмір, форма, колір) і внутрішнім властивостям (смак, текстура, аромат, вміст вітамінів, мінералів і антиоксидантів). Ці рослини забезпечують щоденну потребу в харчуванні, є джерелом поживних речовин і сприяють емоційному благополуччю людини.

Зростання чисельності населення, підвищення рівня життя, зменшення площ придатних для обробітки земель і старіння сільськогосподарської робочої сили викликають занепокоєння щодо того, як ефективно використовувати обмежені земельні ресурси для задоволення зростаючого попиту на харчову продукцію, зберігаючи при цьому різноманітність і поживну цінність садівничих культур. Одним із рішень є підвищення якості та врожайності з одиниці площі за допомогою сучасних біотехнологій. Ще одним перспективним напрямом є розвиток систем контрольованого середовища (СЕА), до яких належать внутрішнє землеробство, вертикальні ферми, контейнерні господарства та рослинні фабрики.

Незважаючи на відсутність природного освітлення, в системах СЕА забезпечується й контролюється весь комплекс чинників, необхідних для росту рослин — освітлення, температура, вода, живлення й атмосфера. Це дозволяє успішно вирощувати та збирати врожай у закритих приміщеннях. Такі системи мають низку переваг: незалежність від кліматичних і погодних умов, можливість цілорічного вирощування, економія простору, зниження ризиків захворювань і шкідників, а також підвищення ефективності та якості виробництва.

У контексті урбанізації, яка зумовлює зростання інтересу до міського землеробства, системи СЕА набувають дедалі більшого значення. Водночас точне керування внутрішнім середовищем вимагає значних енергетичних витрат, що спричиняє високі витрати на будівництво та експлуатацію і стримує стрімкий розвиток таких систем.

Рослинна фабрика є високотехнологічною формою сучасного тепличного господарства та специфічним типом системи СЕА. У ній автоматизовано керування параметрами середовища — температурою, вологістю, освітленням, водою та поживними речовинами — за допомогою комп'ютерних систем. Це мінімізує або повністю усуває вплив зовнішніх чинників і забезпечує ефективне цілорічне виробництво.

Рослинні фабрики класифікуються за джерелами освітлення на два типи: з виключно штучним освітленням (PFAL) та комбінованим (природним і штучним). Завдяки повністю закритій конструкції PFAL-системи дозволяють

точно регулювати мікроклімат, знижують ризик мікробного забруднення та ураження патогенами й шкідниками, що дає змогу отримувати високоякісну садівничу продукцію.

У порівнянні з традиційними теплицями або відкритим ґрунтом, PFAL-системи демонструють значно вищу ефективність використання ресурсів. Наприклад, ефективність використання води може досягати 95%, а вуглекислого газу й добрив — 80–90%. Урожайність з одиниці площі у таких фабриках може перевищувати показники відкритого ґрунту у 100 разів. Закрите середовище також сприяє вирощуванню без використання пестицидів і точному регулюванню вмісту функціональних компонентів, таких як поліфеноли й вітаміни.

Разом з тим PFAL мають певні обмеження: висока частка початкових інвестицій (75–80% становить вартість обладнання), значна енергозалежність (70–80% електроенергії витрачається на освітлення), а також обмежений асортимент культур (переважно листові овочі).

Порівняно з традиційним землеробством, PFAL-системи мають унікальні переваги для використання в міських умовах, на непридатних для обробки територіях (наприклад, підвалах чи порожніх будівлях) і дозволяють скорочувати логістичні ланцюги завдяки принципу "вирощено поруч із споживачем".

Для підвищення сталості PFAL потребують розвитку інтелектуальних світлодіодних технологій та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Вони є перспективним рішенням для ефективного і стійкого вирощування високоцінних культур з рекордною врожайністю (до $200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$) та можливістю повторного використання ресурсів (вода, CO_2).

4.1.2. Розвиток PFAL-систем

Розвиток рослинних фабрик зі штучним освітленням (PFAL) умовно поділяють на три етапи:

- етап випробувань і досліджень (1940-ті — початок 1970-х років);
- етап демонстрації та впровадження (1970-ті — кінець 1990-х років);
- етап стрімкого розвитку (з початку XXI століття до сьогодні).

На початковому етапі основою розвитку PFAL стали технології живлення рослин поживними розчинами та штучного регулювання середовища (див. **рис. 4.1.1**). Першу камеру штучного клімату було збудовано в Каліфорнії у 1949 році. Вона стала новаторською у сфері контролю параметрів середовища росту рослин і вперше поєднала систему електричного освітлення з кліматичним керуванням.

У 1950–1960-х роках у США, Японії, Данії, Австрії почали з'являтися великі штучні кліматичні камери, які застосовувалися для експериментальних досліджень і вирощування овочів. На цьому етапі переважно використовувалися натрієві лампи високого тиску. Проте низький ККД за площею, високе тепловиділення та значні експлуатаційні витрати обмежували використання рослинних фабрик переважно у дослідницьких цілях.

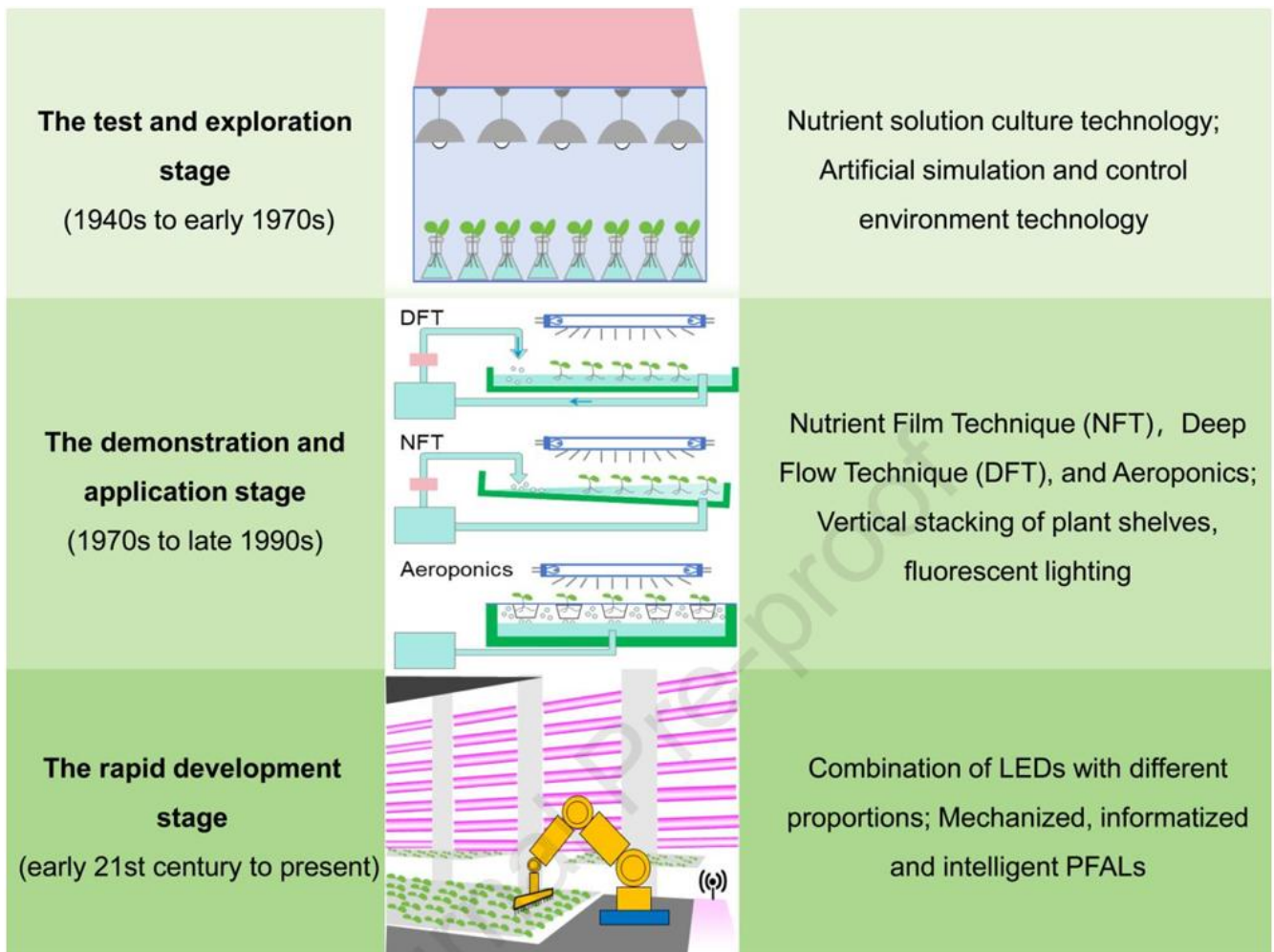


Рис. 4.1.1. Етапи розвитку рослинних фабрик зі штучним освітленням (PFAL)
Розвиток PFAL охоплює три основні етапи: етап випробувань і досліджень, етап демонстрації та впровадження, а також етап стрімкого розвитку. Ліва частина рисунка відображає хронологічні межі кожного з етапів, центральна — схематичне зображення характерних технологій, що застосовувалися на відповідних етапах, а права — ключові технологічні досягнення кожного періоду.

Із 1970-х років розвиток гідропонних систем і технологій штучного освітлення сприяв розширенню можливостей демонстрації та практичного застосування PFAL. Гідропоніка передбачає заміну ґрунту поживним розчином, який забезпечує рослини водою, мінералами та киснем. У PFAL набули поширення такі методи, як технологія живлення тонким шаром (NFT), система глибокого шару (DFT) та аеропоніка із замкнутим циклом циркуляції розчину. На відміну від NFT і DFT, аеропоніка передбачає розпилення поживного розчину на корені рослин, що вільно висять у повітрі, забезпечуючи їх зволоження та вентиляцію.

Саме Японія першою ввела термін «рослинна фабрика» й ініціювала розроблення PFAL у 1974 році. Важливий прорив стався у 1985 році, коли було впроваджено автоматизовану систему живлення. До кінця 1990-х років основним

джерелом освітлення в PFAL стали люмінесцентні лампи з меншою тепловіддачею, які замінили натрієві лампи високого тиску.

Важливою інновацією стало впровадження багаторівневих стелажів для вирощування рослин, що суттєво підвищило ефективність використання простору всередині приміщень, забезпечило помітне зростання врожайності порівняно з традиційним сільським господарством і значно розширило сферу демонстраційного застосування PFAL у цей період.

4.1.2. Напрями досліджень і впровадження інновацій у PFAL

Протягом останніх десятиліть дослідження, присвячені рослинним фабрикам зі штучним освітленням (PFAL), зосереджувалися на вдосконаленні джерел штучного освітлення, впровадженні нових моделей вирощування та оптимізації умов середовища й живлення. Наприклад, окрім фіксації рослин за допомогою губчастих матеріалів, для підтримки кореневої системи широко застосовуються як неорганічні (мінеральна вата, перліт, вермікуліт), так і органічні (торф, кокосовий субстрат, деревне волокно) субстрати. Вони забезпечують стабільність кореневого середовища, баланс між водою й повітрям у прикореневій зоні та сприяють нормальному закріпленню рослин.

У PFAL-системах взаємодія між середовищем вирощування та мікрофлорою ризосфери може суттєво впливати на ріст і розвиток культур, зокрема листових овочів. Субстратні системи добре поєднуються з методами живлення типу «прилив–відплив» або крапельного зрошення. Недостатній рівень кисню (гіпоксія) у кореневій зоні знижує проникність коренів для води та елементів живлення, що пригнічує ріст. Навпаки, підвищення вмісту розчиненого кисню (DO) у гідропонних розчинах сприяє зростанню біомаси, зокрема листя. Було доведено, що перенасичення DO позитивно впливає на розвиток листя салату в умовах PFAL.

Особливої уваги заслуговує вода з нанопухирцями (NB), у якій концентрація розчиненого кисню у 45–60 разів перевищує показники для ґрунтової, водопровідної чи очищеної води. Використання NB (з DO близько 39 мг/л) суттєво покращує розвиток кореневої системи та нарощування біомаси в таких культурах, як редис, червона гірчиця й пак-чой. Це свідчить про широкі перспективи її застосування в гідропонному вирощуванні паростків і листових овочів у PFAL.

Однак високі витрати на електроенергію історично обмежували комерційне впровадження таких систем. Часткове вирішення цієї проблеми стало можливим завдяки впровадженню світлодіодних джерел освітлення (LED). У порівнянні з білими люмінесцентними лампами, LED забезпечують вищу ефективність фотосинтетично активного випромінювання, менше тепловиділення та знижене споживання електроенергії.

Хоча перші світлодіоди було створено ще у 1962 році, вони тривалий час не могли забезпечити достатній рівень світла для фотосинтезу. Значного прогресу вдалося досягти завдяки поєднанню синіх LED, люмінесцентного освітлення та червоних світлодіодів, а також завдяки оптимізації спектрального

складу світла. Комерційні PFAL-системи з LED-освітленням почали впроваджуватись у Японії вже у 2005 році, однак широкого поширення набули після 2015 року. Значні зрушення у розвитку PFAL також спостерігались у Південній Кореї, хоча комерційне використання LED-систем там розпочалося лише у 2009 році.

У США використання PFAL для вирощування рослин розпочалося у 1980-х роках. На початку 2000-х років ці системи почали застосовувати для виробництва фармацевтичних препаратів, а вже до 2017 року на території країни діяло понад 30 PFAL, орієнтованих на харчову продукцію. Особливістю північноамериканських систем є активна підтримка роздрібними мережами локального виробництва та органічної продукції.

В останні роки стрімкий розвиток таких технологій, як штучний інтелект (AI), великі дані (Big Data), Інтернет речей (IoT) і хмарні обчислення, сприяв трансформації PFAL у багатьох країнах — зокрема Японії, Нідерландах, США — у напрямі механізації, цифровізації та інтелектуалізації.

Попри те, що Китай почав розвивати PFAL пізніше, темпи індустріального зростання там є найвищими. Китайські дослідження зосереджені на підвищенні фотонної ефективності (кількість фотосинтетично активного світла на одиницю спожитої енергії), загальної енергоефективності, оптимізації параметрів середовища й живлення, створенні інтелектуальних кіберфізичних систем керування та обладнання нового покоління, що сприяє активному впровадженню PFAL у промисловість.

4.1.3 Технології та обладнання в PFAL

Рослинні фабрики зі штучним освітленням (PFAL) інтегрують передові технології, такі як тривимірне багатошарове безґрунтове вирощування, штучне освітлення, інтелектуальний контроль навколишнього середовища та автоматизоване управління виробництвом рослин, що дозволяє досягати високої продуктивності у будь-який час року.

Тривимірне багатошарове безґрунтове вирощування базується на використанні вертикально складених стелажів та інтегрованих систем подачі води і добрив, що підвищує ефективність виробництва та використання площі у обмежених просторах. Основне обладнання включає системи зберігання і подачі поживних розчинів — баки для рідких речовин, ємності для посадки, посадкові плити та систему циркуляції поживного розчину. Інтегрована система точного зрошення автоматично регулює формули поживних розчинів, забезпечуючи оптимальне живлення рослин на різних стадіях росту та підвищуючи ефективність використання добрив на 40–50%.

Освітлення є критичним фактором середовища, оскільки слугує джерелом енергії для фотосинтезу і запускає фотоморфогенез, а також фізіологічні, біохімічні й молекулярні реакції у рослинах. В основі систем штучного освітлення PFAL використовуються екологічно безпечні напівпровідникові джерела світла — світлодіоди (LED), які не містять ртуті. Оскільки світлодіоди є холодними джерелами світла, вони генерують мінімальне тепло, що запобігає

опікам листя і дозволяє ефективно застосовувати багатoshарову технологію вирощування. Світлодіодне освітлення також дає змогу гнучко налаштувати спектр світла для стимулювання певних процесів морфогенезу у рослин. Стратегічне розміщення LED-ламп, включно з верхнім і додатковим підсвічуванням, підвищує врожайність листових овочів більш ніж на 30%, а бічне освітлення стимулює цвітіння хризантем.

Інтелектуальні системи контролю середовища в PFAL охоплюють управління приготуванням поживних розчинів, зрошенням, вентиляцією, температурою та комп'ютерним контролем (рис. 4.1.2). Враховуючи широке застосування технології інтегрованого водно-добривного режиму, системи підготовки поживних розчинів і зрошення разом формують інтелектуальний контрольний комплекс. Ці системи аналізують потреби рослин у воді та добривах, змішують елементи живлення, рідкі добрива та воду у пропорційні розчини для оптимального поглинання рослинами.

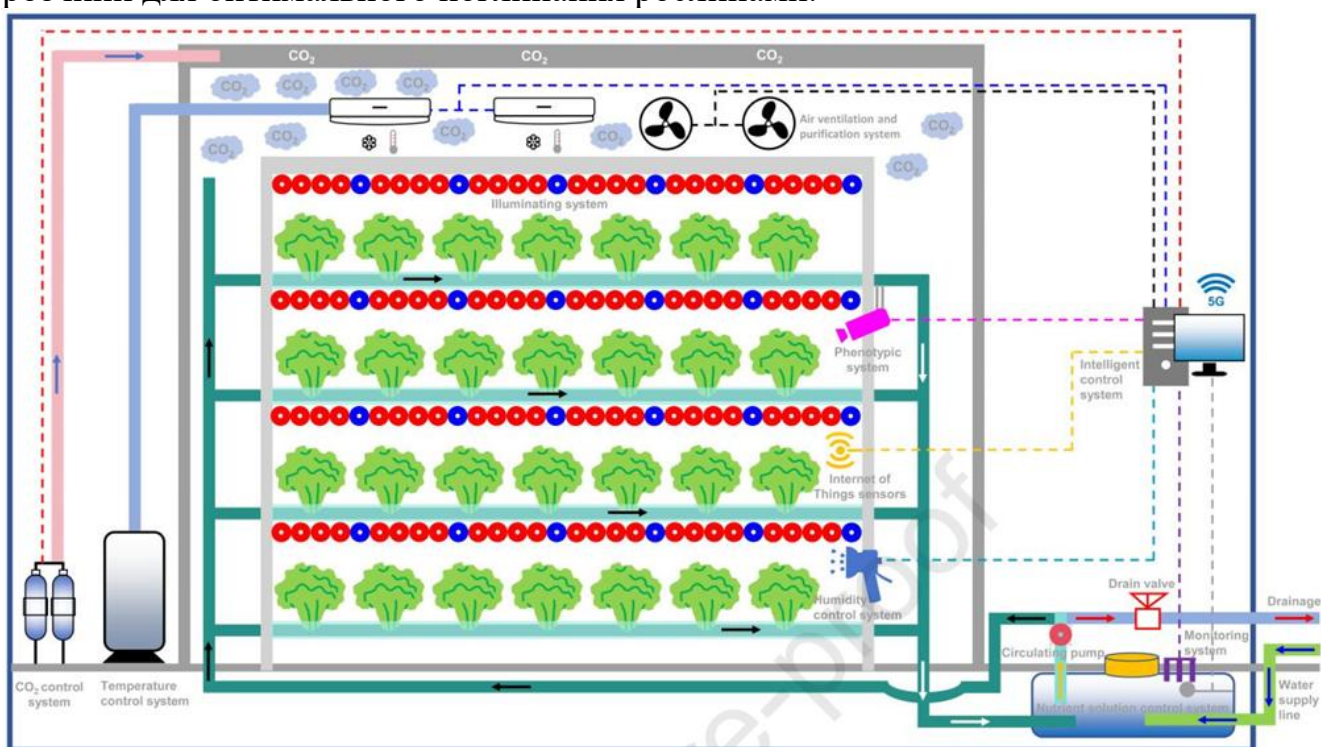


Рис. 4.1.2. Структурна схема інтелектуальної рослинної фабрики зі штучним освітленням (PFAL)

Вентиляційні системи, що поєднують природну та примусову вентиляцію, знижують температуру повітря, регулюють вологість та підвищують концентрацію вуглекислого газу. Збагачення CO₂ у PFAL підвищує врожайність листових овочів на 30–45% і покращує енергоефективність систем.

Теплоізоляційні властивості стін, стель і підлог мають вирішальне значення для енергоспоживання та підтримання однорідності мікроклімату. Коефіцієнт теплопередачі (U-значення) матеріалів визначає потреби у охолодженні чи опаленні для стабільного температурного режиму. Матеріали з високим U-значенням сприяють інтенсивнішому теплообміну із зовнішнім середовищем, знижуючи внутрішні теплові навантаження й енергоспоживання.

Натомість матеріали з низьким U-значенням зменшують теплові втрати, але можуть вимагати більших початкових інвестицій.

Нерівномірність теплового обміну по поверхні споруд PFAL призводить до формування локальних температурних градієнтів і дефіциту тиску водяної пари (VPD). Особливо ризик конденсації виникає при охолодженні стін і стель, де тепле й вологе повітря контактує з холодними поверхнями. Нерівномірний повітряний потік, який створюють вентилятори у поєднанні з конвекцією від ламп, формує неоднорідний розподіл температури. Температура й вологість відіграють ключову роль у регуляції VPD — високі температури і низька вологість підвищують VPD, що пригнічує фотосинтез і знижує ефективність водокористування рослинами.

У багатошарових вертикальних системах щільне розміщення стелажів ускладнює циркуляцію повітря, формуючи виразні вертикальні температурні перепади між верхніми й нижніми ярусами. Вузькі проходи між стелажимами обмежують відведення тепла конвекцією і збільшують ступінь регуляції відкриття продихів у рослин. Для оптимізації мікроклімату і підвищення врожайності застосовують регулювання просторового розташування стелажів, використання зміщених орієнтацій і інтеграцію повітропроводів.

У системах PFAL застосовуються передові технології автоматизації виробничого простору, що включають роботи для пересадки рослин, мобільне обладнання для регулювання джерел світла, пристрої підйому на базі штучного інтелекту (AI) та механізми для рухомого збирання врожаю. Робот для пересадки автоматично ідентифікує якість сіянців, що підвищує швидкість та якість пересадки.

Мобільне обладнання для джерел світла регулює спектр, інтенсивність та фотоперіод освітлення відповідно до потреб різних культур, забезпечуючи цільове опромінення крон рослин та багатошарове тривимірне вирощування. Це сприяє економії електроенергії та кращому використанню простору.

Пристрої підйому на базі штучного інтелекту і механізми рухомого збирання врожаю виконують роботи з високим навантаженням, значно знижуючи інтенсивність ручної праці та витрати на посадку.

Сучасні інновації спрямовані на підвищення енергоефективності та автоматизації. Наприклад, світлодіоди з квантовими точками, виготовлені зі змішаною кристалічною структурою, можуть працювати безперервно понад 4,5 року з мінімальними втратами яскравості, демонструючи надвисоку ефективність і стабільність.

Моделювання мікроклімату PFAL за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення показує, що оптимальне освітлення дозволяє мінімізувати надмірне тепловиділення від LED і знижує витрати електроенергії.

Роботи для пересадки, керовані штучним інтелектом, досягають точності розпізнавання придатних сіянців понад 98%, що може значно підвищити ефективність виробництва. Водночас, обсяги даних для застосування методів глибокого навчання у PFAL поки що недостатні.

Незважаючи на значний прогрес у розробці і впровадженні обладнання для PFAL, існують ключові обмеження. Високі початкові капіталовкладення та операційні витрати стримують масштабування технології. Перспективні напрямки досліджень включають створення систем переробки ресурсів з інтеграцією фотогальванічних панелей і відновлення поживних речовин, використання теплоізоляційних матеріалів для зниження тепловтрат, інтелектуальне регулювання LED-систем відповідно до добового циклу та розвитку рослин, а також оптимізацію прогнозних моделей на основі штучного інтелекту.

У майбутньому, завдяки швидкому розвитку штучного інтелекту, Інтернету речей, біоінформатики, робототехніки та комп'ютерних мереж, інтелектуальні PFAL стануть ще більш досконалими, щоб ефективно відповідати потребам міського сільського господарства та викликам кліматичних змін.

4.1.4. Застосування PFAL у садівництві

4.1.4.1. Використання PFAL для вирощування листових овочів

Рослинні фабрики зі штучним освітленням (PFAL) переважно застосовують для вирощування компактних листових овочів, таких як салат, через обмеження площі. Дослідження ґрунтовно вивчали вплив світлового середовища (якість світла, інтенсивність, фотоперіод) у PFAL на ріст, врожайність та поживну цінність салату.

Червоне (620–700 нм) та синє (400–500 нм) світло мають ключове значення для фізіології салату. Червоне світло стимулює ріст і фотосинтез, а синє регулює біосинтез метаболітів і пригнічує надмірне розростання. Сполучення червоного та синього світла (RB) синергетично підвищує біомасу та рівень фенольних антиоксидантів порівняно з монохроматичним світлом.

Оптимальним для салату у гідропоніці є співвідношення червоного та синього світла 2,7:1 при загальному денному світловому інтегралі 12,6 моль·м⁻²·день⁻¹. Біле світло з додаванням такого співвідношення R:В покращує енергетичну ефективність та накопичення вуглеводів, тоді як збільшення частки синього світла стимулює виробництво фенольних антиоксидантів.

Додаткове далеке червоне світло (720–780 нм) підвищує врожайність за рахунок поліпшення азотного обміну, а синє світло під білим LED сприяє накопиченню корисних для здоров'я сполук. Це свідчить про ефективність FR і В світла як допоміжних джерел для вирощування салату.

Поєднання RB із зеленим (RBG), оранжевим (RBO) та далекочервоним (RBFR) світлом підвищує біомасу пагонів. RBG покращує площу листків, чистий фотосинтетичний показник і світлову ефективність, RBO — фотосинтетичну спроможність, а RBFR збільшує площу листя, але знижує фотосинтез і сприяє появі опіків кінчиків листя. Тому RBG і RBO є оптимальними для росту.

З додаванням 30 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ зеленого світла до червоного й синього (при співвідношенні R:G:В 211:30:53) досягається максимальна маса свіжого врожаю, тоді як

надмірне зелене світло (≥ 50 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) знижує врожайність.

Вузькосмугове жовте світло знижує концентрацію розчинних цукрів, а помірне фіолетове їх підвищує, що підкреслює важливість спектрального налаштування для регулювання якості продукції.

Транскриптомні та метаболомні дослідження під різними спектрами світла надали механістичне розуміння для оптимізації середовища.

Оптимальна фотосинтетично активна інтенсивність (PPFD) є критичною для підвищення врожайності та якості салату. Збільшення PPFD від 100 до 250 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ значно покращує біомасу, провідність продохів, ефективність водокористування, світлову ефективність та вміст фенольних сполук. Рівень 250 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ PPFD вважається оптимальним для ефективного використання ресурсів у закритому вирощуванні.

Хоча висока PPFD знижує квантову ефективність фотосистеми II, реакції різних сортів салату на PPFD відрізняються.

Під якістю світла R4B1 при 250 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ PPFD підвищується швидкість фотосинтезу, але може збільшуватися виділення автотоксинів.

Додаткове верхнє підсвічування (30–60 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) у поєднанні з нижнім освітленням (200 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) уповільнює старіння зовнішніх листків і підвищує врожайність.

У системах штучного освітлення безперервне світло (CL) і змінне світло (AL) по-різному регулюють метаболізм салату. Аномальні цикли світло/темрява (наприклад, 120 хв світла/60 хв темряви) підвищують ефективність листової асиміляції та накопичення сухої речовини, а короткі фотоперіоди (6 год світла/2 год темряви) при 290 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ стимулюють синтез антоціанів.

Безперервне світло (R1B1, 100–200 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) підвищує вміст корисних елементів (K, Ca, Fe, Zn), але порушує ритми вуглеводного обміну.

Порівняно з AL, CL за однакових денних світлових інтегралів підвищує накопичення антиоксидантів.

Застосування перед збиранням врожаю циклу світло/темрява 8 год/4 год сприяє одночасному підвищенню врожайності, вмісту фітокомпонентів і енергоефективності.

Виникнення опіків кінчиків листя, пов'язане з дефіцитом кальцію, залежить від PPFD, температури та руху повітря. Поєднання 250 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ PPFD з низькими температурами сприяє формуванню хрумкого листя і зменшує випадки опіків.

Підвищення швидкості повітря від 0,25 до 0,75 м/с покращує газообмін і знижує ризик опіків.

Зонування та оптимізація вентиляції з використанням різних налаштувань вентиляторів у PFAL також сприяють зменшенню опіків шляхом покращення аеродинаміки.

Збагачення повітря CO₂ до 800 мкмоль/моль суттєво підвищує світлову ефективність і врожайність.

Використання червоного світла разом із поживними розчинами стимулює синтез амінокислот.

Поступове внесення озону перед збиранням збільшує рівень антиоксидантів без уповільнення росту.

Розчин із чвертьовою концентрацією поживних речовин і $350 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ PPFD підвищує вміст розчинних білків, вітаміну С і загальну антиоксидантну здатність.

Генерація негативних іонів повітря у напрямку вниз у PFAL максимально підвищує врожайність порівняно з бічним або верхнім їх виробленням.

Ріст і накопичення глюкозинолатів (ГСЛ) у китайській капусті (*Brassica alboglabra*) суттєво залежать від умов освітлення, які змінюються внаслідок комплексної дії інтенсивності, якості світла та фотоперіоду на різних етапах росту. Додавання додаткового далекого червоного (FR) світла знижує вміст глюкозинолатів, одночасно підвищуючи рівень амінокислот-прекурсорів. Вплив ультрафіолетового А світла (UV-A, 320–400 нм) за 10 днів до збирання підвищує біосинтез глюкозинолатів, стимулюючи експресію генів, які відповідають за їх утворення. Особливо ефективним є UV-A світло з довжиною хвилі 405 нм, що краще сприяє накопиченню фенольних сполук і росту рослин у порівнянні з коротшими довжинами хвиль, хоча механізми світлової сигналізації ще потребують вивчення.

Для броколі оптимальна фотосинтетично активна інтенсивність (PPFD) становить $50 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для максимального свіжого та сухого врожаю, тоді як $70 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ покращує концентрацію розчинних білків, цукрів та антиоксидантів. Ультрафіолетове В (UV-B, 280–315 нм) випромінювання підвищує вміст біоактивних сполук, зокрема загальних фенольних та флавоноїдних речовин, які корелюють із сумарною енергією UV-B впливу, хоча ця кореляція варіює залежно від положення листка та стадії розвитку. Незважаючи на те, що UV-B та стрес посухи окремо стимулюють синтез вторинних метаболітів, їх поєднання за 3 дні до збирання не дає синергетичного ефекту, що свідчить про те, що стрес посухи сам по собі максимізує антиоксидантний потенціал кале в PFAL.

Глибина поживного розчину має значний вплив на профіль фітокомпонентів: дрібна глибина (1–2 см) сприяє засвоєнню хлорофілу та поживних речовин, а більша (3 см) підвищує вміст каротиноїдів, розчинних цукрів, вітаміну С та загальних глюкозинолатів. Отже, оптимізація глибини поживних розчинів у PFAL потребує подальших досліджень для балансу між врожайністю та поживною якістю.

Коріандр найкраще росте за світлового режиму R3B1 ($200 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ PPFD, 16 год світла / 8 год темряви), що оптимізує густоту продохів, фотосинтез та нітратредукцію. Пак чой демонструє вищу біомасу та поживну цінність при співвідношенні R1W2 (R:W = 1:2), хоча R2W1 збільшує рівень глюкозинолатів. Водяний крес оптимально росте та накопичує глюкозинолати при $160 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ PPFD і 20-годинному фотоперіоді, хоча вплив спектрального складу світла повністю не вивчений.

Дикоростуча латука (sowthistle) досягає максимальної врожайності при електропровідності (ЕС) $2,0 \text{ дС}\cdot\text{м}^{-1}$, $200 \text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ PPFD і відстані між рослинами $15\times 10 \text{ см}$. Синтез флавоноїдів у перилі найкраще підтримується при рівнях PPFD від 100 до $300 \text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ у поєднанні з ЕС $1,0\text{--}3,0 \text{ дС}\cdot\text{м}^{-1}$.

4.1.4.2. Застосування PFAL у виробництві плодів та ягід

Комерційне вирощування томатів у повністю закритих PFAL має складнощі через великі розміри рослин, тривалі цикли росту та високі експлуатаційні витрати. Особливо вразливі ранні етапи розвитку, коли дисбаланс між джерелом і споживачем та надлишок фотосинтетичних продуктів викликають набряки листя, що погіршує врожайність плодів. Рівень лікопіну знижується при обробці далекою червоною (FR) світлом під час зав'язування плодів і після їх дозрівання. Опромінення ультрафіолетом А (UV-A) підвищує вміст загальних розчинних речовин, титровану кислотність і аскорбінову кислоту, але зменшує розмір плодів і вміст каротиноїдів у карликових червоних помідорах, що підкреслює необхідність регулювання часу та інтенсивності UV-A залежно від сорту. Контроль ламінарного потоку повітря, спектрів червоного (R) і синього (B) світла та температури дозволяє досягати комерційних рівнів виробництва та якості плодів томатів. Покращене управління мікрокліматом, ймовірно, збільшить врожайність томатів, що свідчить про перспективність їх комерційного вирощування у PFAL найближчим часом.

Контрольоване середовище PFAL знижує ризики ураження шкідниками та вплив погодних умов, водночас підвищуючи продуктивність суниці. Червоне світло (RL, 660 нм) підвищує фотосинтетичну активність, але знижує довгострокову фотосинтетичну здатність порівняно з синім світлом (BL, 450 нм). Синє світло і довжини хвиль RL (685 нм) пришвидшують цвітіння і строки збору врожаю. Збагачений зелений спектр (20% BL + 60% RL при $420,6 \text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ PPFD) оптимізує ріст, врожайність і якість плодів за рахунок покращення фотосинтезу та водоутримувальної здатності рослин (WUE).

Для розмноження живцями системи T-PFAL досягають максимальних показників, використовуючи рослини-слоніки з діаметром крони 5 мм і двома справжніми листками, які відокремлюють через 20 днів після укорінення. Зелено-сині світлодіоди (Mint W LEDs, MWL), багаті на зелені хвилі, перевершують традиційне освітлення (теплі W LED та холодні W люмінесцентні лампи) за ефективністю утворення живців і розмноження. Доповнення MWL 20% вузькоспектральним синім світлом покращує ріст живців без подовження циклів росту, на відміну від монохромного синього світла.

Змішані спектри R+B стимулюють раннє цвітіння, високу фотосинтезу та збалансовану якість плодів (високий вміст розчинних твердих речовин, низька титрована кислотність) у чорниці, тоді як монохромне R або B світло погіршує розмір або смакові властивості плодів. Раціон поживних речовин з співвідношенням N:P:K = 2:1:1 оптимізує засвоєння поживних речовин і розвиток пагонів. Молекулярні механізми взаємодії світлових рецепторів поки що залишаються недостатньо вивченими.

4.1.4.3. Застосування PFAL у вирощуванні розсади

Інтенсивність світла та спектральна якість є ключовими факторами, що впливають на ріст томатів, фотосинтез, врожайність та якість у PFAL. Під час вегетативної стадії фотосинтетичний фотонний потік (PPFD) 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ із співвідношенням червоного до синього світла (R:B = 9:1) підвищує ефективність використання радіації у карликових томатів. Для прищепленої розсади додаткове червоне світло при білому LED-освітленні покращує накопичення сухої речовини, компактність рослин та товщину листя, а підвищений PPFD до 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ у фазі приживлення стимулює ріст і якість рослин. Синергетичні стратегії світла і температури показали, що PPFD 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ при низькій нічній температурі (15 ± 1) °C оптимізує ріст, тоді як PPFD 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ з вищою нічною температурою (18 ± 1) °C допомагає збалансувати споживання електроенергії в тепліші сезони.

Доповнення ультрафіолетом (UV) допомагає запобігти фізіологічним порушенням: UV-B світло запобігає набрякам листя і стебел при недостатності UV, хоча реакції різних сортів потребують індивідуального підбору інтенсивності. У огірка вища інтенсивність світла і тривалість світлового дня покращують компактність розсади, але знижують ефективність використання світла (LUE); при цьому ріст щеплених пагонів більш чутливий до різниці між денною і нічною температурою (DIF), ніж підщепа. Оптимальне співвідношення R7B3 (R:B = 7:3) покращує фотосинтетичні показники, але надлишок червоного світла може пригнічувати ріст. Черрі-редька потребує мінімум 240 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD при співвідношенні R2B1 і фотоперіоді 16/8 годин для формування товарної коренеплоду, при цьому інтенсивність світла має більший вплив, ніж спектральна якість. Листя моркви при електропровідності (EC) 3,0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (вирощування 20—25 днів) накопичує вищу суху речовину та феноли, що робить його придатним для функціональних харчових продуктів.

4.1.4.4. Застосування PFAL у вирощуванні декоративних та лікарських рослин

Освітлення з перериванням ночі (NI) регулює фотоморфогенез та цвітіння *Petunia hybrida*, змінюючи умови довгого дня (LD). Обробки NI з використанням зелених (NI-G), червоних (NI-R), далекочервоних (NI-Fr) або білих (NI-W) LED сприяють цвітінню, тоді як синє світло (NI-B) його пригнічує. NI-G, NI-B і NI-R активують експресію фоточутливих генів (*phyA*, *phyB* та *cry1*) у порівнянні з LD/коротким днем (SD), що свідчить про спектр-специфічну транскрипційну регуляцію.

У хризантемах напрямок світла істотно впливає на морфологію і фізіологію. Верхнє та бокове освітлення покращують орієнтацію листя для ефективного захоплення світла, стимулюючи галуження та цвітіння. Бокове освітлення також оптимізує внутрішню структуру листя, розташування хлоропластів, провідність продихів та ефективність фотосинтезу порівняно з верхнім чи нижнім освітленням. Механізми розподілу ауксину в зігнутих стеблах і листках під боковим світлом потребують подальшого вивчення.

Вирощування канабісу у PFAL орієнтоване на контрольоване середовище для забезпечення безпеки і цілорічної продуктивності, що дозволяє отримувати до шести урожаїв на рік. Якість світла критично впливає на біосинтез канабіноїдів: спектри L3/L4 (MW 240, R35B25G40) підвищують рівні реактивних форм кисню (ROS), прискорюють дозрівання і збільшують вміст канабідіолу (CBD), канабідіолової кислоти (CBDA) та суміжних метаболітів. Застосування дініконазолу (DIN) в концентрації 25 мг·л⁻¹ оптимізує архітектуру жіночих рослин, врожай суцвіть і виробництво канабіноїдів у PFAL з обмеженим простором. Глобальна легалізація медичного та рекреаційного канабісу у США, Канаді та Південній Африці стимулює попит на оптимізовані системи виробництва.

Для *Agastache rugosa* додавання 10⁻⁷ М індол-3-оцтової кислоти (IAA) у поживний розчин збільшує накопичення розмаринової кислоти (RA), тілініну та ацетину, а електропровідність (EC) 4,0 дС·м⁻¹ максимізує синтез біоактивних сполук без пригнічення росту. Шафран демонструє оптимальний вегетативний ріст і формування бульб при EC 0,7 дС·м⁻¹, тоді як EC 2,1 дС·м⁻¹ викликає оксидативний стрес.

Безперервне освітлення (CL, 24 год) при денному світловому інтегралі (DLI) 17,3 моль·м⁻²·день⁻¹ збільшує біомасу настурції, її антиоксидантну активність і фенольний вміст, причому біомаса лінійно зростає при більших DLI. *Stevia rebaudiana* досягає максимальних показників біомаси та виробництва стевіозидів при спектрі R-B із додаванням зеленого світла (16 год фотоперіод), підвищуючи ефективність використання електроенергії. Дводенне освітлення білими LED оптимально стимулює синтез баїкаліну, баїкалейну і воконіну у сіянців *Scutellaria baicalensis*.

Для меліси 450 нм синє світло посилює ріст і врожайність, а 435 нм синє світло підвищує фотосинтетичну активність. Попередня обробка зеленим світлом скорочує час проростання і покращує якість сіянців у священного базиліку, при цьому 0,4% KNO₃ під білим LED максимізує рівень проростання. Кореневі сапоніни женьшеню досягають максимуму при PPFD 75—100 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, збалансувавши фотосинтетичну акліматизацію та ріст. Безґрунтові системи при 20—25 °С покращують ріст кульбаби та концентрацію сапонінів, перевершуючи ґрунтове вирощування і умови високої температури (30 °С).

PFAL кардинально змінили вирощування екологічно-фізіологічно покращених розсади шляхом впровадження закритих систем виробництва розсади (CTPS). Ці системи забезпечують точний контроль навколишнього середовища, що дозволяє скоротити тривалість виробничих циклів розсади на 30%—40%, підвищуючи таким чином річну врожайність на одиницю площі порівняно з традиційними тепличними технологіями (рис. 4.1.3). CTPS ефективні для розмноження щеплених сіянців та рослин багатьох видів, зокрема томатів, перцю, огірків, лохини, полуниці та *Dendrobium officinale*.

Крім того, PFAL характеризуються здатністю відокремлювати репродуктивні цикли від сезонних обмежень, суттєво скорочуючи періоди росту

культур завдяки оптимальному регулюванню середовища. Ця властивість відкриває цінні можливості для селекції овочевих культур. Для селекційних підприємств прискорене впровадження нових ознак і гібридних сортів через PFAL може призвести до підвищення прибутковості. Наразі ведуться роботи над розробкою надійних селекційних технологій у рамках PFAL для ключових овочевих культур, спрямованих на прискорення селекційних процесів і надання суттєвих технічних інновацій у розвитку культур.

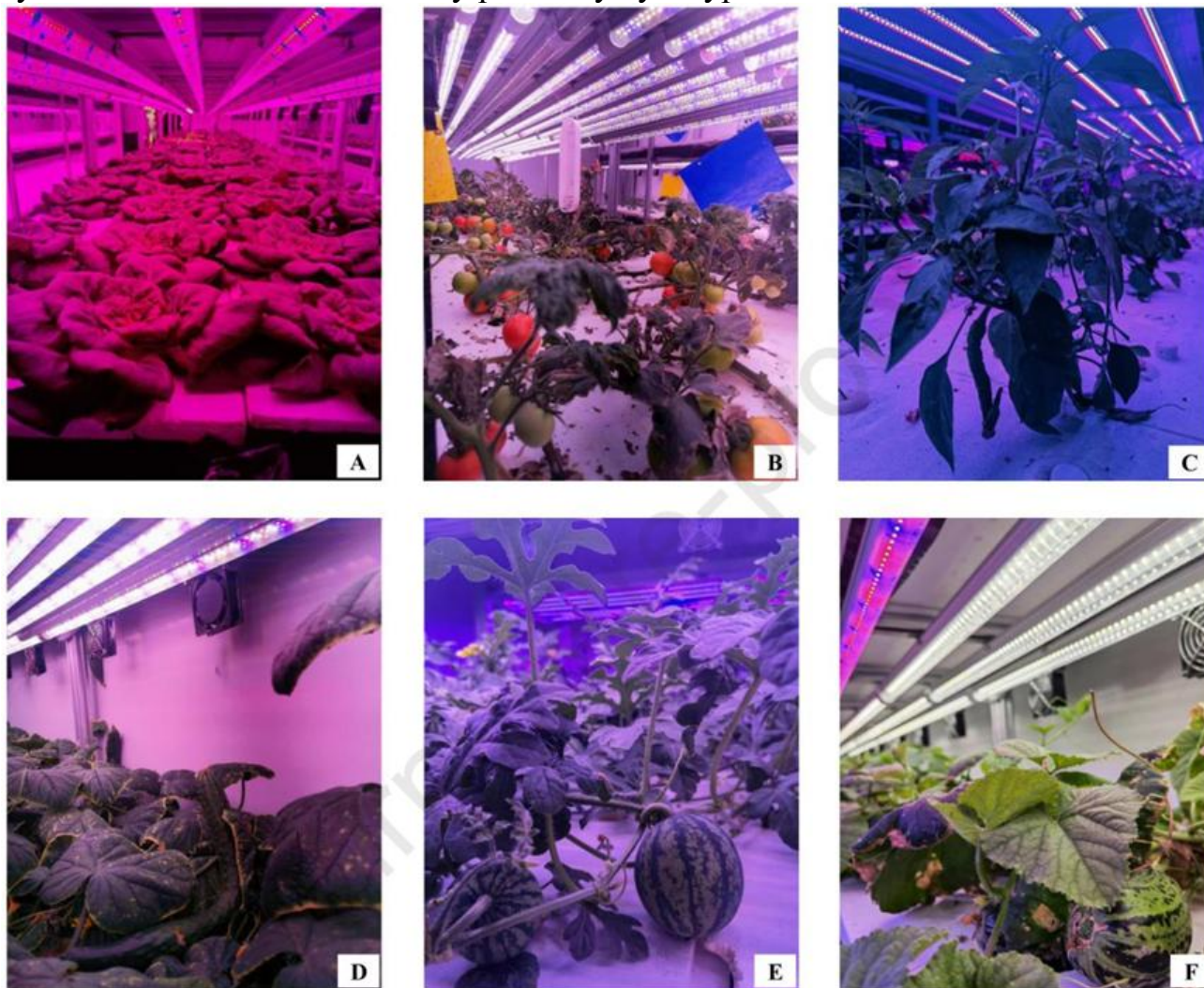


Рис. 4.1.3 Декілька овочевих культур, вирощуваних у PFAL: (А) Салат; (В) Томат; (С) Перець; (D) Огірок; (Е) Кавун; (F) Диня. Ці овочеві культури вирощуються за допомогою систем живлення поживними розчинами.

4.1.5. Виклики PFAL у рослинництві

4.1.5.1. Високі початкові витрати на будівництво

Головною перепоною для впровадження PFAL є значні початкові інвестиції. Порівняно з традиційними теплицями, зокрема пасивними сонячними теплицями або багатопрілітними конструкціями, PFAL потребують суттєво більших капіталовкладень через необхідність спеціалізованого інженерного забезпечення і складного обладнання для підтримки контрольованого середовища. Витрати зростають зі збільшенням технологічної складності і зменшуються зі збільшенням масштабів виробництва. Наприклад,

масштабування PFAL у 100 разів може знизити вартість будівництва на одиницю площі приблизно на 55%, що свідчить про ефект масштабу.

4.1.5.2. Високі експлуатаційні витрати на енергію та працю

PFAL мають значні постійні експлуатаційні витрати, зокрема через великий споживання електроенергії для підтримки заданих параметрів середовища. На штучне освітлення припадає від половини до більшої частини енергоспоживання, що формує значну частку у загальних виробничих витратах. Крім того, висока трудомісткість менш автоматизованих систем знижує рентабельність. Через це деякі PFAL, зокрема в Північній Америці, зазнали фінансових невдач, тоді як в Японії їм сприяють державні субсидії та тісна співпраця науковців і виробників.

4.1.5.3. Економічна життєздатність і прийняття на ринку

Економічна стабільність PFAL залишається проблемою, особливо для виробництв салату, які дуже вразливі до коливань цін і врожайності. Зниження врожаю чи ціни навіть на 30% може призвести до збитків. Незважаючи на високу якість продукції та преміальні ціни, це часто стримує попит серед споживачів, особливо у ціново чутливих та ще не сформованих ринках, що ускладнює досягнення прибутковості.

4.1.5.4. Обмежений вибір культур і технічні обмеження

Наразі PFAL здебільшого використовують для вирощування зелених листових овочів з коротким циклом росту і компактною формою. Розвиток більш широкого асортименту поживних культур стримується відсутністю стандартизованих технологічних протоколів. Незважаючи на початок вирощування високовартісних культур, відсутність системного підходу у виробничих технологіях ускладнює комерціалізацію та зменшує ефективність бізнесу.

4.1.6. Майбутні тенденції застосування PFAL у рослинництві

Для подолання ключових викликів у рослинництві в PFAL необхідно зосередитись на стратегічних інноваціях у технологіях, біології та створенні ринкової вартості.

4.1.6.1. Інтеграція технологій для оптимізації витрат

Високі витрати на будівництво та експлуатацію потребують системного впровадження новітніх технологій. Модульне оновлення та невелике масштабування існуючих об'єктів, таких як висотні будівлі, підземні приміщення, камери для росту рослин і морські контейнери, значно знижують початкові інвестиції. Поєднання світлодіодного освітлення з штучним інтелектом та IoT-технологіями дає змогу розробити енергоменеджментні системи, які максимально ефективно використовують електроенергію для освітлення. Крім того, розвиток простих інтелектуальних роботів та допоміжного обладнання забезпечує високий рівень автоматизації та мінімізує пошкодження під час пересадки та збору врожаю, що знижує витрати на працю.

4.1.6.2. Біологічні інновації для розширення асортименту культур

Щоб розширити різноманітність культур у PFAL, необхідні біотехнологічні новації, що долають існуючі біологічні обмеження. Глибоке розуміння факторів, які регулюють ріст, врожайність і якість рослин, є основою для створення інтелектуальних систем контролю середовища, що точно налаштовують умови і живлення. Технології редагування геному, зокрема генів фотоморфогенезу, якості та карликовості, дозволяють оптимізувати форму рослин під штучне освітлення та створювати компактні високоякісні культури для багатоярусного вирощування. Також можливий розвиток нових сортів, адаптованих до світлових умов PFAL, а також використання синтетичних мікробних спільнот і фоліарних пробіотиків для покращення засвоєння поживних речовин і зменшення витрат на поживні розчини. Геномне селекціонування і карти кількісних ознак сприятимуть створенню високоякісних функціональних культур, зокрема лікарських і декоративних.

4.1.6.3. Формування ланцюгів створення цінності для стійкості ринку

Для зниження економічної вразливості продукції PFAL необхідно розробляти диференційовані ринкові стратегії. PFAL ідеально підходять для міських умов, підтримуючи локальне виробництво для локального споживання. Основна маркетингова діяльність має орієнтуватись на міських споживачів із вищими доходами або підвищеним попитом на органічні овочі. Інтеграція PFAL у міські оселі, спільноти, навчальні заклади, ресторани і супермаркети може посилити їх соціально-економічну значимість. Формування сильної торгової марки PFAL підвищить впізнаваність серед споживачів. Висока комерційна вартість лікарських рослин на одиницю сухої ваги відкриває перспективи бізнесу в контрольованих умовах. Також підвищена простежуваність продукції в ланцюгу поставок збільшує готовність споживачів платити за продукцію PFAL.

4.1.6.4. Розвиток екосистеми за допомогою політики

Сталий розвиток PFAL потребує інституційних інновацій, що виходять за межі існуючих моделей субсидій, аби подолати проблему «технічно можливе, але комерційно не вигідне». Поетапне впровадження податкових пільг для НДДКР, програм обміну обладнання на автоматизоване та торгівля вуглецевими кредитами можуть значно зменшити високі витрати на електроенергію. Створення національного інноваційного фонду PFAL та механізму розподілу ризиків підтримає операторів. Посилення технічних стандартів і систем сертифікації підвищить бар'єри входу на ринок, а співпраця держави з науковими інституціями створить відкриті платформи, які полегшать доступ до нових технологій, особливо для малих підприємств.

4.1.7. Висновки

PFAL є революційною аграрною системою, що забезпечує цілорічне виробництво високоякісної продукції незалежно від зовнішніх умов. У цьому огляді підсумовано досягнення у технологіях, обладнанні та застосуванні PFAL у рослинництві, а також визначено основні виклики, зокрема високі капітальні та операційні витрати і значні енергетичні потреби. Запропоновано стратегії зниження витрат, такі як оновлення існуючої інфраструктури, оптимізація умов

вирощування для прискорення росту культур та впровадження робототехніки для зменшення трудових затрат. Завдяки диверсифікації продукції високовартісними культурами та інтеграції в міське середовище, PFAL можуть підвищити прибутковість і привабливість для ринку. Очікується, що майбутні розробки інтелектуальних PFAL систем забезпечать сталий і стабільний постачальний ланцюг високоякісної рослинницької продукції.

4.2 СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕПЛИЦЬ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ, ВИКЛИКИ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ

4.2.1. Вступ

Сучасні теплиці відіграють ключову роль у забезпеченні безперервного вирощування сільськогосподарських культур протягом року, незалежно від погодних умов. Завдяки створенню контрольованого середовища вони сприяють підвищенню врожайності та якості продукції, захищаючи рослини від стресових факторів зовнішнього середовища та шкідників.

Застосування інноваційних технологій — автоматизованих систем керування мікрокліматом, точного регулювання температури та вологості, додаткового освітлення, гідропонних і аквапонних установок — забезпечує оптимальні умови для росту культур. Крім того, теплиці дозволяють зменшити використання пестицидів і водних ресурсів завдяки ефективним системам зрошення, що сприяє розвитку сталого сільського господарства.

Водночас одним із головних викликів залишається підтримання комфортного мікроклімату в теплиці в умовах високих літніх температур. Охолодження повітря в такі періоди потребує значної кількості енергії та води, що підвищує експлуатаційні витрати й екологічне навантаження. Наприклад, у країнах з посушливим кліматом системи охолодження можуть споживати до половини всієї енергії теплиці, а в особливо спекотних регіонах ця частка ще вища.

Залежно від кліматичних умов, для охолодження теплиць застосовуються два основні підходи — пасивний та активний. Пасивне охолодження базується на природній вентиляції та затіненні, що дозволяє знижувати температуру повітря без використання енерговитратного обладнання. Проте за надмірної спеки такі методи часто є недостатніми. У таких випадках застосовують активні системи охолодження, які хоч і забезпечують більш ефективно зниження температури, але потребують великих витрат енергії й води, а також мають суттєвий вплив на довкілля.

В умовах зростаючого енергоспоживання та посилення кліматичних змін виникає потреба у комплексному підході до створення сталих тепличних систем. Це передбачає не лише оптимізацію охолоджувальних технологій, а й впровадження відновлюваних джерел енергії. Сонячні панелі, вітрогенератори чи геотермальні системи можуть слугувати джерелом енергії для охолодження теплиць, зменшуючи залежність від викопного палива.

Однак перехід до енергонезалежних рішень пов'язаний із низкою викликів. Зокрема, відновлювані джерела енергії мають непостійний характер: сонячні панелі не працюють уночі, а вітрові установки — за відсутності вітру. Це вимагає застосування ефективних систем зберігання енергії. Ще одним бар'єром є висока вартість встановлення таких систем, що ускладнює їх впровадження в малих і середніх господарствах. Крім того, існує потреба в спеціалізованих автоматизованих системах керування енергоспоживанням, які наразі не є доступними для багатьох теплиць, особливо в регіонах, що розвиваються.

Для ефективного переходу до сталого охолодження необхідно поєднувати гібридні енергетичні рішення, системи накопичення енергії та новітні технології енергоефективного охолодження. Такий підхід сприятиме зменшенню енергетичних витрат, підвищенню екологічності виробництва та економічній життєздатності тепличного господарства.

Раціональне використання води та енергії в системах охолодження теплиць сприяє досягненню кількох Цілей сталого розвитку. Такі системи забезпечують стабільне виробництво харчових продуктів завдяки підтриманню оптимальних умов для росту рослин, дозволяють ефективно використовувати воду в регіонах з її обмеженими ресурсами, а також знижують енергоспоживання завдяки впровадженню відновлюваних джерел енергії. Це, у свою чергу, зменшує експлуатаційні витрати, стимулює інновації, підтримує економічну стабільність та розвиток технологій. Крім того, такі системи сприяють відповідальному використанню природних ресурсів, зниженню викидів парникових газів та створенню стабільного мікроклімату, що позитивно впливає на агробіорізноманіття. Досягнення цих результатів потребує співпраці між державними установами, громадськими організаціями та бізнесом з метою поширення кращих практик сталого управління охолодженням у тепличному господарстві.

Попри велику кількість досліджень у сфері охолодження теплиць, залишаються невирішеними кілька важливих науково-практичних питань. Зокрема, йдеться про оцінку впливу на довкілля, інтеграцію відновлюваних джерел енергії та формування комплексного підходу до забезпечення сталості. Багато досліджень зосереджені лише на окремих аспектах охолодження, залишаючи поза увагою практичні рекомендації, які могли б бути застосовані у виробничих умовах.

Одна з основних прогалин полягає у недостатній увазі до впровадження відновлюваних джерел енергії у тепличні системи охолодження. Хоча енергоефективність активно вивчається, роль «зелених» джерел у забезпеченні сталого функціонування теплиць досі недооцінена. Новітні дослідження намагаються заповнити цю нішу, пропонуючи конкретні рекомендації щодо впровадження відновлюваних технологій.

Ще одна малодосліджена сфера — це водозбереження в системах охолодження, що особливо важливо в умовах дефіциту води. І хоча вже існують технології, спрямовані на економію водних ресурсів, бракує комплексних оцінок їх ефективності та практичного впровадження у тепличних господарствах.

Комбіновані рішення, що поєднують водозберігаючі технології з відновлюваними джерелами енергії, відкривають перспективи для підвищення стійкості та оптимізації ресурсів.

Часто попередні дослідження обмежувалися аналізом лише одного чинника сталості — енергії або води, що заважає формуванню повноцінних рішень. У відповідь на це було запропоновано системний підхід, який охоплює всі ключові аспекти: енергетику, водні ресурси та екологічний вплив. Такий підхід здатен забезпечити ефективні рекомендації для фахівців агросектору та органів управління.

Для виявлення тенденцій та прогалин у дослідженнях застосовано бібліометричний аналіз, який дозволяє оцінити розвиток наукової думки в цій галузі. Окремо проаналізовано ключові технології охолодження, їх ефективність та екологічні наслідки. Також враховано регіональні особливості, включно з кліматичними умовами, наявністю енергоресурсів та економічними чинниками, що впливають на вибір і впровадження сталих рішень.

4.2.2. Бібліометричний та систематичний огляд літератури щодо сталих систем охолодження теплиць

4.2.2.1. Джерела даних та методика збору інформації

У цьому розділі представлено джерела, процес збору даних та методи аналізу, що використовувалися під час бібліометричного та систематичного огляду літератури (SLR), присвяченого сталим системам охолодження теплиць. Основними платформами для пошуку наукових праць були Scopus і Web of Science. Для формування вибірки використовувалися такі ключові слова: «Сталий охолоджувальний режим теплиць», «Енергоефективне охолодження теплиць», «Технології охолодження теплиць», «Пасивні методи охолодження теплиць», «Активні охолоджувальні системи в теплицях», «Клімат-контроль у тепличних умовах», «Стійке сільське господарство у теплицях», «Стратегії охолодження для аридних і напіваридних регіонів», «Вентиляція теплиць», «Затінення теплиць», а також «Відновлювана енергетика для охолодження теплиць».

Пошук було обмежено публікаціями англійською мовою, що вийшли у період з 1973 по 2024 рік. До аналізу включалися лише ті роботи, що безпосередньо стосувалися сталих та енергоефективних методів охолодження теплиць. Статті, які не відповідали тематиці або були недоступні у повному тексті, виключалися. Відбір проводився за назвами, анотаціями та повними текстами публікацій.

Під час відбору було надано перевагу оригінальним дослідницьким роботам, тоді як оглядові статті виключалися. Це дозволило уникнути викривлення результатів через повторні посилання на одні й ті самі джерела та зберегти автентичність ідей авторів першоджерел. Хоча початковий пошук охоплював публікації англійською, французькою, іспанською та китайською мовами, до остаточного аналізу включалися лише англійські джерела.

Дублікати були вилучені, а статті перевірені на відповідність тематиці охолодження теплиць.

У результаті системного відбору було визначено 473 наукові публікації, що забезпечує широку та об'єктивну репрезентацію сучасних досягнень у сфері охолодження теплиць. Для проведення бібліометричного аналізу використовувалося програмне забезпечення VOSviewer, за допомогою якого були досліджені публікаційна активність, мережі співавторства та кількість цитувань. Структурування матеріалу здійснювалося відповідно до протоколу PRISMA для виявлення основних тематичних напрямів і визначення наявних прогалин у дослідженнях. Додатково проводилася якісна оцінка, яка забезпечила відповідність вибраних досліджень науковим стандартам та їхню релевантність. Для порівняння ефективності та екологічності різних методів охолодження було застосовано статистичний аналіз, що дозволило отримати важливу інформацію для подальших досліджень і розробок у цій галузі.

4.2.2.2. Бібліометричний аналіз

У межах аналізу було розглянуто 473 наукові публікації, присвячені сталим системам охолодження теплиць. Дослідження охоплює часовий період з 1973 по 2024 рік і враховує динаміку публікацій за роками, країнами, авторами, журналами та ключовими словами. Це дало змогу оцінити наукові інтереси та тенденції у сфері клімат-контролю теплиць.

4.2.2.2.1. Хронологічні особливості розвитку досліджень у сфері охолодження теплиць

На початковому етапі — з 1973 по 1997 рік — активність у цій галузі була мінімальною. У середньому виходило менше 5 публікацій на рік, а в окремі роки взагалі не було фіксовано жодної роботи. Це можна пояснити низьким рівнем обізнаності про проблеми сталого сільського господарства, відсутністю технологічної бази, а також обмеженим фінансуванням таких досліджень.

Із 1998 року спостерігається поступове зростання кількості публікацій. Проте з 1999 по 2005 роки кількість робіт знову зменшилася — причиною могли бути зміни у пріоритетах наукового фінансування, економічні кризи та зміщення політичного фокусу. Водночас ці коливання відображають загальні цикли розвитку наукових досліджень у галузі енергоефективних технологій.

Починаючи з 2006 року, інтерес до сталих технологій охолодження різко зріс. Зростання цін на енергоносії, загострення екологічних проблем і усвідомлення глобальної енергетичної вразливості призвели до активізації досліджень у сфері використання відновлюваних джерел енергії для охолодження теплиць. У цей період активно впроваджуються нові підходи до оптимізації клімату в тепличних господарствах.

Протягом 2006–2016 років кількість публікацій зросла майже вдвічі, що відображає глобальне переорієнтування аграрної науки на принципи сталого розвитку. Цей період також збігся з активізацією міжнародних ініціатив у сфері протидії зміні клімату та запровадженням фінансових стимулів для досліджень у галузі зеленої енергетики.

Із 2015 року, у зв'язку з посиленням вимог до екологічної стійкості сільського господарства, дослідницька активність ще більше зростає. Особливо помітне зростання спостерігалось у відповідь на виклики, пов'язані з пандемією COVID-19, яка підкреслила необхідність у стійких агросистемах, здатних функціонувати за умов глобальних змін.

Загалом, останнє десятиліття продемонструвало стає зростання наукової уваги до систем охолодження теплиць. Ця тенденція, ймовірно, збережеться і надалі, враховуючи ключову роль таких технологій у забезпеченні продовольчої безпеки та адаптації до кліматичних змін.

4.2.3. Систематичний огляд літератури

4.2.3.1. Еволюція технологій охолодження теплиць (1973–2024)

Протягом останніх п'яти десятиліть системи охолодження теплиць пройшли шлях від найпростіших до високотехнологічних рішень, спрямованих на підтримання оптимального мікроклімату при мінімальному впливі на довкілля.

У 1970–1980-х роках переважали природна вентиляція та затінення. Вентиляція забезпечувалась через відкриті бокові та дахові отвори, використовуючи природне підняття теплого повітря та надходження холоднішого зовні. Це рішення було недорогим, але залежало від погодних умов і часто виявлялось неефективним у спекотну погоду. Затінення здійснювалося за допомогою тканин або сіток, які блокували або розсіювали сонячне світло, знижуючи температуру в теплиці. Однак ці методи могли призводити до нерівномірного охолодження та зниження освітленості, що негативно впливало на фотосинтез.

У 1990-х роках у практику впроваджуються механічні системи охолодження. Зокрема, популярності набули системи випарного охолодження, які базуються на використанні енергії випаровування води. Одним з поширених рішень стала система «вентилятор–зволожувальна панель», де повітря проходить через змочену поверхню, охолоджується й потрапляє до теплиці. Згодом почали застосовувати туманоутворювальні системи високого тиску та геотермальні рішення, які дозволяли досягти стабільної температури при зниженому енергоспоживанні.

Початок 2000-х ознаменувався активним впровадженням обчислювального моделювання мікроклімату в теплицях. Використання чисельного моделювання потоків повітря дозволило оптимізувати розташування вентиляційних систем і поліпшити розподіл температур. Автоматизовані системи керування мікрокліматом стали відповідати в режимі реального часу на зміни погодних умов, що підвищило ефективність охолодження та зменшило витрати ресурсів.

У період з 2010 по 2024 рік акцент змістився на інтеграцію високих технологій з принципами сталого розвитку. Високотехнологічні системи зволоження, геотермальне охолодження, теплові насоси, сонячні установки, а також використання матеріалів з фазовим переходом (PCM) стали основою нової

хвилі інновацій. Наприклад, в регіонах із дефіцитом води популярними стали туманоутворювальні системи, що охолоджують повітря без істотного підвищення вологості. У країнах із високим рівнем сонячної інсоляції використовуються гібридні системи, що поєднують випарне охолодження, вентиляцію та сонячну енергію.

Особливої уваги заслуговує впровадження інтелектуальних систем управління мікрокліматом на базі штучного інтелекту та Інтернету речей (AIoT), які забезпечують динамічне регулювання температури, вологості й подачі води. Такі рішення значно підвищують врожайність, ефективність водокористування та загальну продуктивність теплиць.

Таким чином, еволюція систем охолодження теплиць відображає безперервний рух до ефективніших, стабільніших та екологічно збалансованих технологій, які здатні забезпечити сталий розвиток агровиробництва навіть в умовах глобальних кліматичних змін.

4.2.3.2. Технології сталого охолодження теплиць

Технології сталого охолодження теплиць можна поділити на три основні категорії: пасивні системи, активні системи та гібридні системи.

Пасивні системи використовують природні процеси для підтримання стабільної температури, значно знижуючи споживання енергії за рахунок використання природних умов навколишнього середовища. Це можуть бути методи природної вентиляції, затінення, теплоізоляції та інші рішення, що мінімізують потребу у механічному втручанні.

Активні системи застосовують механічні пристрої для активного видалення тепла з середовища теплиці, що дозволяє точно і ефективно регулювати температуру, створюючи ідеальні умови для росту рослин. До них належать системи випарного охолодження, кондиціонування, теплові насоси та інші технічні рішення, які потребують енергії для роботи.

Гібридні системи поєднують переваги пасивних і активних методів. Вони переважно використовують природні способи охолодження, але при необхідності автоматично вмикають механічні пристрої для додаткового контролю температури. Такий підхід підвищує загальну ефективність тепличних систем, знижує енергоспоживання і водночас сприяє сталості агровиробництва, мінімізуючи негативний вплив на довкілля.

4.2.3.2.1. Пасивні системи охолодження

а) Природна вентиляція

Природна вентиляція стала ключовою стратегією для охолодження теплиць, особливо серед пасивних методів, що використовують природні процеси для регулювання температури повітря. Вперше основні принципи природної вентиляції були сформульовані Буларом у 1993 році, який підкреслив важливість різниці температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем теплиці та швидкості вітру як основних факторів, що впливають на повітрообмін.

У наступні роки були розроблені математичні моделі, які дозволяли прогнозувати ефективність різних конфігурацій вентиляції, зокрема важливість розташування та розміру вентиляційних отворів для оптимального охолодження.

У 2000-х роках проведено багато експериментальних досліджень, які поєднували польові вимірювання з комп'ютерним моделюванням потоків повітря (CFD). Наприклад, дослідження Фатнассі та колег у 2002 році показали важливість правильного розташування вентиляційних отворів для забезпечення ефективної вентиляції у теплицях для вирощування томатів у напівпосушливому кліматі.

Подальші дослідження показали, що дизайн теплиці, включно з використанням сіток для захисту від шкідників, може впливати на ефективність природної вентиляції, а також на рівень транспірації рослин. Досліди, проведені у 2005 році, підтвердили, що розмір і орієнтація вентиляційних отворів суттєво впливають на внутрішню температуру і рух повітря.

У 2010-х роках відбулися значні успіхи у вдосконаленні моделей природної вентиляції, що дозволили більш точно оцінювати її вплив на мікроклімат теплиць. Зокрема, використання CFD-моделювання допомогло оптимізувати розміри і розташування отворів, що покращує обмін повітря. Також встановлено, що зовнішні умови — швидкість і напрямок вітру — мають суттєвий вплив на ефективність вентиляції.

Недавні дослідження показали, що висота рослин може перешкоджати руху повітря всередині теплиці, що вимагає ретельного планування вентиляційних систем. У складних кліматичних умовах природна вентиляція часто потребує доповнення механічними методами охолодження для забезпечення стабільного мікроклімату.

Таким чином, розвиток природної вентиляції як пасивного методу охолодження теплиць відображає поступове накопичення знань про оптимізацію конструкцій теплиць і підвищення енергоефективності систем охолодження, особливо у посушливих та напівпосушливих регіонах. Важливо розглядати природну вентиляцію у комплексі з іншими пасивними та активними методами для досягнення найкращих результатів у підтриманні оптимальних умов росту рослин.

б) Затінення

Затінення в теплицях — це широко застосовуваний метод охолодження і зниження теплового стресу рослин, який реалізується за допомогою різних стратегій: біління дахів, зовнішнє затінення, теплові екрани та сонячне затінення через агровольтаїку. Ці методи зменшують проникнення сонячної радіації, що допомагає знизити внутрішню температуру і створити комфортні умови для росту рослин.

Один із найдавніших методів — біління дахів вапном, що полягає у нанесенні розчину кальцію на зовнішню поверхню скла або плівки теплиці для відбиття сонячного світла. Це ефективно знижує нагрівання теплиці в спекотні місяці, підтримуючи більш прохолодний мікроклімат і запобігаючи перегріву.

Проте біління має свої недоліки: його ефективність залежить від погодних умов, а також воно може погіршувати рівномірність освітлення всередині теплиці. Надмірне біління може зменшувати розмір плодів і знижувати врожайність, тому важливо знаходити баланс між затіненням і забезпеченням достатнього світла для фотосинтезу.

Сучасні затінювальні екрани стали популярнішою альтернативою білінню, оскільки вони забезпечують більш стабільний і контрольований рівень світла. Затінення екранами дозволяє гнучко регулювати інтенсивність затінення (наприклад, 40 %, 50 %, 60 %), що дозволяє адаптувати умови під конкретні культури і пору року. Екрани рівномірніше розподіляють світло, знижують появу «гарячих» зон і спрощують технічне обслуговування порівняно з білінням.

Затінювальні системи стабілізують мікроклімат, роблячи температуру в зоні росту рослин більш однорідною, знижуючи стрес і сприяючи кращому росту. Вони також сприяють зниженню енергоспоживання і водокористування.

Окрім цього, сучасні технології, такі як агровольтаїка, дозволяють поєднувати затінення з виробництвом електроенергії від сонячних панелей, що додатково підвищує стійкість тепличних господарств.

Нещодавно фотогальванічні (PV) панелі стали інтегруватися в дахи теплиць, пропонуючи різні варіанти прозорості — від непрозорих до напівпрозорих і повністю прозорих. Така універсальність дозволяє регулювати рівень сонячної радіації, що проходить через панелі, впливаючи на ріст рослин або мінімально втручаючись у природні умови.

Цей підхід створює подвійне призначення: одночасне виробництво електроенергії та сільськогосподарське виробництво, що підвищує стійкість і економічну доцільність теплиць. Напівпрозорі PV панелі не лише знижують сонячну інсоляцію і допомагають підтримувати нижчу внутрішню температуру повітря, а й генерують електроенергію для живлення систем контролю навколишнього середовища.

Важливо, що можна генерувати значну кількість електроенергії, не знижуючи при цьому передачу сонячного світла, за умови оптимального розташування PV модулів і правильної орієнтації теплиці залежно від широти і сезону.

Експериментальні дослідження показали, що установка PV панелей усередині теплиць під кутом приблизно 20 градусів забезпечує кращу ефективність у порівнянні з іншими кутами нахилу. Також встановлено, що розміщення панелей у шаховому порядку покращує розподіл світла всередині теплиці та мінімізує негативний вплив затінення.

Різноманітні конструктивні рішення дозволяють зменшувати покриття PV масивом даху або варіювати схеми встановлення, що оптимізує баланс між виробництвом енергії та освітленням для рослин.

Гібридні системи, які поєднують PV і теплові елементи, можуть покращувати клімат в теплицях і знижувати залежність від викопного палива. Агровольтаїка, яка поєднує сонячні панелі з сільськогосподарськими культурами, стає перспективним рішенням для ефективного використання обмежених земельних ресурсів.

Практичні дослідження підтверджують, що PV системи можуть забезпечувати енергетичні потреби теплиць без суттєвого погіршення росту та врожайності культур. Водночас, надмірне затінення через панелі може зменшувати ріст і врожайність, тому потрібен ретельний баланс.

Зокрема, використання PV панелей дає змогу економити енергію на опаленні і охолодженні, підвищувати прибутковість господарств і сприяти зниженню екологічного навантаження.

Динамічне регулювання затінення за допомогою рухомих PV панелей дозволяє адаптувати освітлення до потреб рослин у різні сезони, підвищуючи ефективність системи.

Втім, через зміну клімату і збільшення температур, лише затінення не завжди достатньо. Для забезпечення оптимальних умов необхідно поєднувати його з іншими охолоджувальними технологіями, такими як випарне охолодження, системи з рідкими десикантами або гібридні рішення. Такий комплексний підхід підвищує стійкість рослин, знижує споживання води й енергії і сприяє сталому розвитку сільського господарства у складних кліматичних умовах.

Отже, затінення є важливою складовою системи охолодження теплиць, проте для ефективної боротьби з високими температурами його слід розглядати як частину комплексної стратегії.

4.2.3.2.2. Активні системи охолодження

а) Системи випарного охолодження

Системи випарного охолодження широко застосовуються в тепличному господарстві завдяки своїй енергоефективності та екологічності. Вони ґрунтуються на фізичному принципі охолодження повітря шляхом випаровування води, що дозволяє знижувати температуру повітря в теплиці. За конструктивними особливостями такі системи поділяють на три основні типи: пряме випарне охолодження (DEC), непряме випарне охолодження (IDEC) та комбіновані (гібридні) системи.

У системах прямого охолодження, до яких належать «вентилятор і панель», туманні (fog/mist) системи або охолодження через дах, повітря проходить безпосередньо через зволене середовище, знижуючи свою температуру. Вентиляційно-панельні системи протягом останніх десятиліть були предметом численних досліджень і модернізацій, адже вони здатні знижувати температуру повітря на 15–25 °С порівняно з природною вентиляцією. Ефективність охолодження суттєво залежить від кліматичних умов і може досягати 57–77 % у пікові літні дні.

На продуктивність систем значно впливають параметри вентиляції: при збільшенні обміну повітря (наприклад, до 1 об'єму на хвилину) досягається рівномірніший розподіл температури та нижчий її середній рівень, але зростає споживання води та електроенергії. Для оптимізації роботи використовуються комп'ютерні моделі (CFD), які враховують розміри теплиці, площу зволожувальних панелей, швидкість вентиляторів тощо. Наприклад, при зовнішній температурі 40 °С система здатна знизити її до 21 °С, підвищивши вологість з 23 % до 67 %, що створює сприятливе середовище для росту рослин.

Туманні системи застосовуються для точного контролю температури та вологості. Системи високого тиску можуть знижувати температуру на 8 °С та забезпечувати повітряні потоки зі швидкістю менше 1 м/с. Вони сприяють

стабілізації мікроклімату й зменшенню коливань температури, що особливо важливо для чутливих культур.

Водночас системи типу «вентилятор-панель» мають суттєві витрати ресурсів. Споживання води в них становить 8,4–14 л/м² площі залежно від режиму вентиляції. Для зниження витрат розробляються різноманітні оптимізаційні підходи: регулювання швидкості вентиляторів у режимі реального часу, впровадження систем повторного використання води, використання сонячних фотогальванічних панелей для живлення систем охолодження.

Гібридні рішення, які поєднують DEC і IDEC, дозволяють оптимізувати ефект охолодження та зменшити витрати води та енергії. Завдяки застосуванню сенсорних систем моніторингу мікроклімату в теплиці можна автоматизувати процеси управління охолодженням, забезпечуючи ефективно використання ресурсів.

Ефективність DEC-систем значною мірою залежить від таких факторів, як висота панелей, розміщення вентиляторів, їх кількість та швидкість обертання. Наприклад, високе розташування вентиляторів охолоджує верхні яруси рослин, але може підвищити вологість під стелею. Натомість нижнє розташування сприяє більш рівномірному розподілу температури, але може потребувати додаткового зволоження.

У теплицях із напівпосушливим кліматом оптимізація розміщення панелей і вентиляторів дозволяє суттєво покращити охолодження й створити сприятливі умови для культур, таких як томати й перець. Це стимулює фізіологічні процеси у рослин: збільшується відкрите устя (стоматальна провідність), інтенсивність фотосинтезу, покращується загальний розвиток і врожайність.

Також встановлено, що застосування туманоутворення у вирощуванні баклажанів і томатів підвищує ринкову якість плодів. Сучасні туманні системи з регульованою подачею і вентиляцією дають змогу знизити водоспоживання до 36 % і зменшити витрати електроенергії до 30 % у порівнянні з традиційними рішеннями.

У свою чергу, непрямі системи охолодження (IDEC) забезпечують зниження температури без підвищення вологості, що є перевагою в боротьбі з грибковими хворобами. Такі системи є особливо корисними для теплиць, де контроль вологості є критично важливим (рис. 4.2.1.)

Комбіновані системи (DEC + IDEC) можуть бути побудовані за дворівневою або багаторівневою схемою. Це дозволяє адаптувати охолодження до різних кліматичних умов і забезпечити оптимальний мікроклімат навіть у дуже спекотних регіонах.

Загалом, системи випарного охолодження пропонують ефективні рішення для контролю температури в теплицях. Вибір між прямим, непрямим або комбінованим варіантом залежить від кліматичних умов, особливостей вирощуваних культур і наявного бюджету. Найбільш передові системи дозволяють досягти охолодження нижче межі вологотемпературного режиму та забезпечити стабільні умови для високої продуктивності тепличного господарства.

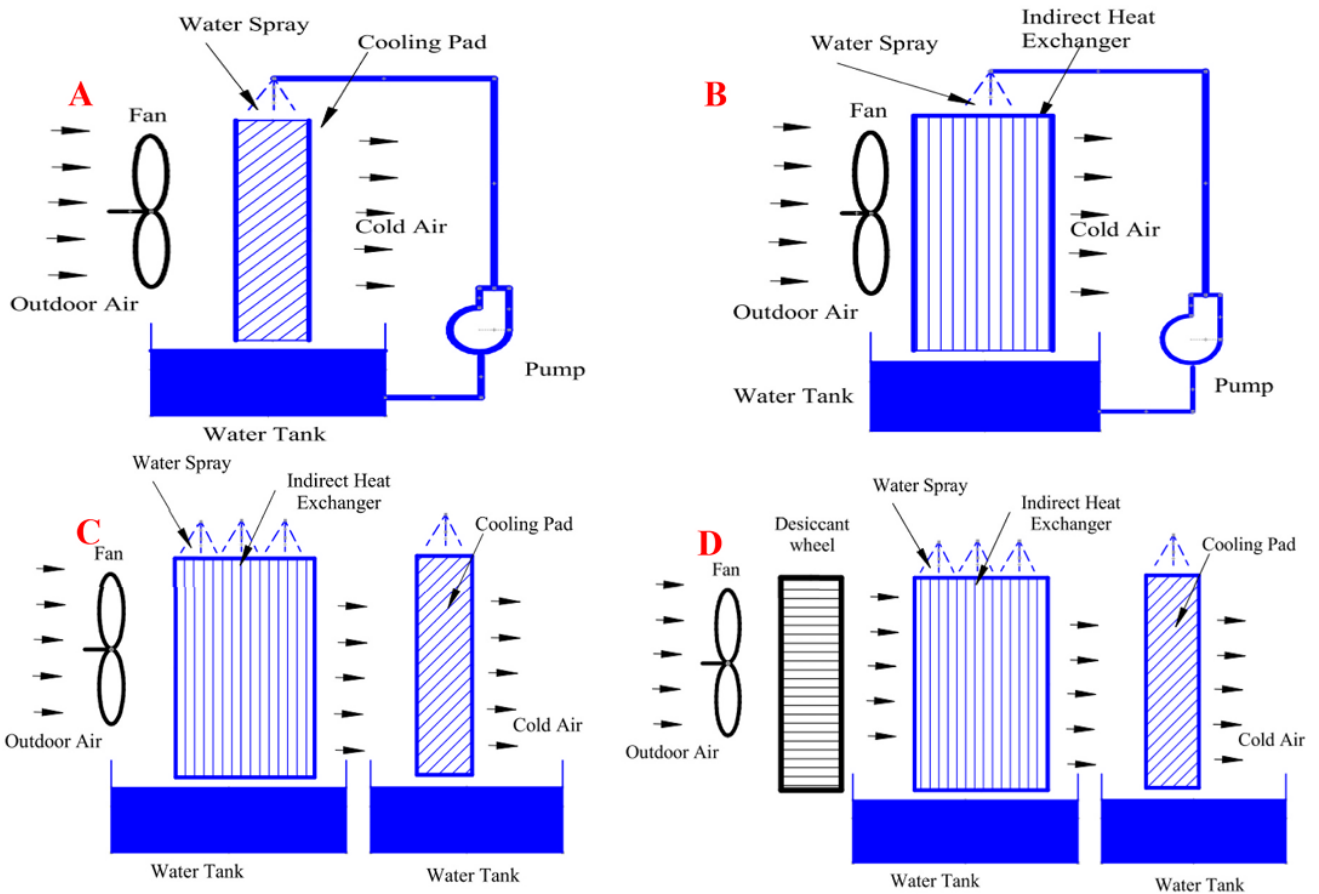


Рис. 4.2.1. Типи систем ECS: А — Пряма ECS, В — Непряма ECS, С — Двоетапна ECS (поєднання непрямой та прямої), D — Багатоступенева ECS із системою осушення

4.2.3.2.3. Гібридні системи охолодження

Гібридні системи охолодження в теплицях поєднують пасивні та активні методи зниження температури з метою створення стабільного та енергоефективного середовища для росту рослин, особливо в умовах спекотного клімату. Пасивні технології, такі як природна вентиляція та затінення, доповнюються активними системами, до яких належать випарне охолодження та механічна вентиляція.

Завдяки процесу випаровування води, який супроводжується поглинанням тепла та зниженням температури повітря, можна ефективно охолоджувати теплицю в умовах посушливого клімату. Одночасно вентилятори забезпечують циркуляцію охолодженого повітря, сприяючи рівномірному розподілу температури у всьому об'ємі теплиці.

Гармонійне поєднання пасивних і активних методів дозволяє оптимізувати контроль температури та вологості, знижує споживання енергії та створює сприятливі умови для фотосинтезу і підвищення врожайності. Такий підхід сприяє зменшенню стресу у рослин і підвищує загальну ефективність функціонування тепличного комплексу.

У деяких випадках гібридні системи дозволяють досягти суттєвої економії енергії. Наприклад, використання керувальних стратегій із прогнозуванням

температури дозволяє зменшити споживання енергії на чверть порівняно з традиційними методами, які працюють за фіксованими правилами.

Ефективне управління мікрокліматом у теплиці передбачає поєднання природної вентиляції, затінення та випарного охолодження. Це дозволяє знизити енергетичні витрати та забезпечити оптимальні умови для росту культур. Конструкція гібридних систем є гнучкою та може адаптуватися до різних кліматичних умов і потреб конкретного тепличного господарства. Зокрема, гібридні системи на базі фотоелектричних і теплових модулів (PV/T) здатні одночасно виробляти електроенергію та тепло, працюючи в різних режимах залежно від сезону.

Інтеграція сучасних методів керування — таких як моніторинг кліматичних параметрів у реальному часі та використання прогнозних моделей — забезпечує ефективну роботу гібридних систем, сприяючи підвищенню як екологічної, так і економічної стійкості. Такі системи є перспективним рішенням для контролю мікроклімату, управління ресурсами та досягнення сталого розвитку в аграрному секторі, особливо в регіонах із високими температурами та обмеженим водопостачанням.

Незважаючи на значний прогрес у підвищенні енергоефективності та зменшенні впливу на довкілля, попереду ще чимало викликів. Подальші інновації, інвестиції та запровадження комплексних підходів є необхідними для зменшення споживання ресурсів і досягнення цілей сталого розвитку тепличного господарства.

4.2.4. Підвищення стійкості систем охолодження теплиць за допомогою стратегій підвищення ефективності та зменшення впливу на навколишнє середовище

4.2.4.1. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в системи охолодження теплиць

Використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергії, у системах охолодження теплиць є важливим кроком до впровадження більш сталих технологій у сільському господарстві. Такий підхід дозволяє не лише знизити екологічне навантаження, а й підвищити ефективність використання ресурсів.

Зокрема, сонячні фотогальванічні (PV) панелі можуть розміщуватися на дахах теплиць або поруч із ними для безпосереднього живлення систем охолодження. Це дає змогу зменшити залежність від електроенергії з традиційних (вуглецевих) джерел і знизити експлуатаційні витрати. Додатково панелі забезпечують ефект затінення, зменшуючи надходження сонячного випромінювання і, відповідно, потребу в охолодженні. У посушливих регіонах це також сприяє зниженню втрат вологи через випаровування.

Проте надмірне затінення може негативно впливати на фотосинтез та врожайність, особливо для культур, чутливих до освітленості. Тому при проектуванні PV-систем необхідно враховувати потреби конкретних рослин і стадії їх розвитку, щоб досягти балансу між охолодженням і доступом до світла.

Крім фотогальванічних, ефективними є також сонячні теплові колектори, які можуть використовуватись для живлення абсорбційних чилерів — систем, що забезпечують охолодження з мінімальним споживанням традиційної енергії. Такі рішення особливо ефективні в регіонах з високою сонячною радіацією, де можуть забезпечити як охолодження, так і обігрів.

У районах із стабільними вітровими потоками доцільним є встановлення малопотужних вітрових турбін для забезпечення додаткової електроенергії. За наявності систем накопичення енергії вони можуть підтримувати роботу теплиць навіть за відсутності вітру чи при перебоях у централізованому електропостачанні.

Іншим прикладом є геотермальні теплові насоси, що використовують сталу температуру підземних шарів для охолодження теплиць. Такі системи споживають значно менше електроенергії, однак їх ефективність залежить від геологічних умов — зокрема теплопровідності ґрунтів і глибини аквіферів. Горизонтальні теплові контури краще працюють у районах з мілким ґрунтовим водоносним горизонтом, тоді як вертикальні — у випадках, коли вода розташована глибше.

Доцільність впровадження того чи іншого відновлюваного джерела значною мірою визначається кліматичними й географічними умовами. Наприклад, у тропічних і субтропічних регіонах з великою кількістю сонячних днів найбільш ефективними є сонячні системи, тоді як вітрові установки доцільно застосовувати в приморських або гірських місцевостях із постійними потоками повітря. Геотермальні насоси ефективні в регіонах із помірним або холодним кліматом, де температура підземних шарів залишається стабільною протягом року.

Розмір і особливості експлуатації теплиць також впливають на вибір технологій. Великі тепличні комплекси можуть застосовувати гібридні енергетичні системи, які об'єднують декілька джерел енергії — наприклад, PV-панелі, геотермальні насоси та вітрові турбіни, — забезпечуючи надійне живлення протягом доби і різних сезонів. Натомість у невеликих теплицях у сільських або посушливих районах доцільно впроваджувати окремі рішення — наприклад, лише сонячні панелі з акумуляторами — з урахуванням доступності ресурсів і фінансових можливостей.

Впровадження відновлюваних джерел енергії в системи охолодження теплиць сприяє зниженню споживання енергії, зменшенню витрат на експлуатацію та скороченню викидів парникових газів. Водночас успішна реалізація таких технологій потребує постійного моніторингу й адаптації до умов, щоб забезпечити їхню стабільну роботу та максимальну ефективність.

4.2.4.2. Використання альтернативних джерел води для охолодження теплиць

Застосування альтернативних водних ресурсів у системах охолодження теплиць, зокрема у вентиляторах із зрошенням (fan and pad), відкриває важливі перспективи підвищення ефективності водокористування в сільському

господарстві, особливо в умовах обмежених запасів прісної води. Дослідження показують, що системи охолодження можуть споживати від 40 % до 70 % загального об'єму води в тепличних господарствах, як це зафіксовано у виробництві томатів в ОАЕ та Омані.

Для розв'язання цієї проблеми досліджуються різні альтернативні джерела води для охолодження теплиць, зокрема солоня вода та очищені стічні води. Технологія Seawater Greenhouse довела ефективність використання 100 % солоні чи морської води для випарного охолодження. У таких системах впроваджується інноваційна технологія охолодження на основі пуцоланових матеріалів, зокрема солестійких цеглин, що забезпечують ефективне охолодження без погіршення роботи обладнання.

Ще одне перспективне рішення — використання очищених стічних вод (treated sewage effluent, TSE), які можуть стати надійним і доступним джерелом для охолодження, водночас сприяючи збереженню водних ресурсів. Проте для уникнення проблем із забиванням обладнання TSE потребує додаткової очистки для забезпечення безпечної й ефективної експлуатації. Впровадження таких рішень також відповідає принципам циркулярної водної економіки, сприяючи повторному використанню води та значному скороченню потреби в прісній воді. Досвід показує, що заміна прісної води очищеними стоками в системах інтенсивного охолодження дає змогу зменшити її споживання майже на дві третини.

Ще однією перспективною стратегією є збір дощової води. У регіонах з достатнім рівнем опадів, але обмеженими запасами прісної води, використання зібраної та накопиченої дощової води для систем охолодження (наприклад, зрошувальних матів або туманоутворення) дозволяє зменшити споживання прісної води на 30–50 %.

Реалізація таких стратегій дозволяє істотно скоротити споживання прісної води, що є важливим кроком до досягнення цілей сталого розвитку, зокрема у сфері раціонального водокористування та збереження довкілля. Інтеграція альтернативних водних джерел у системи охолодження теплиць оптимізує водні ресурси й зменшує екологічний слід сільськогосподарських технологій.

4.2.4.3 Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та Інтернету речей (IoT) для підвищення енергоефективності систем охолодження теплиць

Сучасні підходи до управління мікрокліматом у теплицях активно трансформуються завдяки впровадженню штучного інтелекту (ШІ), Інтернету речей (IoT) та інтелектуальних систем керування. Завдяки поєднанню передових сенсорів, виконавчих пристроїв і адаптивних алгоритмів, тепличні системи охолодження отримують можливість точно регулювати температуру, вологість і вентиляцію, створюючи оптимальні умови для росту рослин.

Однією з ключових переваг ШІ є здатність прогнозувати погодні зміни в режимі реального часу та автоматично коригувати стратегії охолодження. Це дозволяє істотно зменшити споживання енергії, зберігаючи при цьому ідеальні умови для вирощування культур. Завдяки обробці великих масивів даних ШІ

здатний виявляти закономірності, які сприяють раціональному використанню ресурсів і підвищенню загальної ефективності тепличного виробництва.

У практичній реалізації застосовуються різноманітні ШІ-моделі, зокрема нейронні мережі, які точно прогнозують внутрішню температуру теплиці на основі даних із сенсорів. Наприклад, зворотно розповсюджені нейронні мережі демонструють високу точність передбачень завдяки високим значенням коефіцієнта детермінації (R^2) та низьким середньоквадратичним похибкам.

Ще одним перспективним підходом є керування на основі моделей (Model-Based Predictive Control, MBPC), які застосовують складні нелінійні математичні моделі, оптимізовані за допомогою генетичних алгоритмів. Це дає змогу тонко налаштувати параметри систем охолодження для мінімізації витрат енергії та води. Також застосовується нечітке керування (Fuzzy Logic Control, FLC), яке у поєднанні з генетичними алгоритмами забезпечує високу точність і адаптивність до змін навколишнього середовища.

Варто відзначити застосування інтелектуальних систем на основі гібридних методів: поєднання нечіткої логіки, нейронних мереж і генетичних алгоритмів дозволяє ефективно контролювати температуру, вологість і стан ґрунту. Такі системи можуть в режимі реального часу реагувати на зміни, автоматично вмикаючи системи охолодження, туманоутворення або вентиляції відповідно до потреб конкретної культури.

Паралельно з ШІ важливу роль у розвитку тепличних технологій відіграє Інтернет речей. IoT-засоби дозволяють безперервно збирати дані про кліматичні умови та передавати їх у централізовані системи керування. Це забезпечує не лише автоматичне керування, а й дистанційний контроль параметрів мікроклімату з мобільного пристрою або комп'ютера. Поєднання IoT та ШІ дозволяє не лише підвищити ефективність використання ресурсів, а й знизити викиди та втрати.

Завдяки використанню алгоритмів оптимізації, таких як LightGBM, новітні моделі вентиляції дають змогу підтримувати стабільну температуру та концентрацію CO₂ значно ефективніше, ніж традиційні методи. Впровадження таких технологій стає важливим кроком до ресурсозберігаючого, екологічного та прибуткового тепличного господарства.

Отже, інтеграція штучного інтелекту та Інтернету речей у системи охолодження теплиць забезпечує не лише високу ефективність керування кліматом, а й сприяє сталому розвитку сільського господарства. Такі технології мають вирішальне значення в контексті глобальних викликів, пов'язаних із продовольчою безпекою та екологічною стійкістю, і будуть визначати вектор розвитку аграрної галузі в найближчі десятиліття.

4.2.5. Обговорення та висновки

Світові енергетичні кризи, що відбувалися з 1973 по 2024 роки, стали ключовими подіями, які суттєво вплинули на розвиток охолоджувальних систем у теплицях, стимулюючи перехід до більш сталих технологій. Ці кризи були спричинені складною сукупністю історичних, економічних та технологічних

чинників, що підсвітили потребу в енергоефективності та екологічності в різних сферах, зокрема в аграрному секторі.

Перша масштабна енергетична криза 1973 року виявила залежність світової економіки від викопного палива, що спричинило значні потрясіння. Подальші події, такі як революція в Ірані у 1979 році та війна в Перській затоці у 1990-х, ще більше загострили проблему енергетичної безпеки. У 2000-х роках зростання попиту на енергію, зумовлене стрімким розвитком країн, що розвиваються, призвело до рекордного зростання цін на нафту. Після світової фінансової кризи 2008 року інвестиції у відновлювану енергетику скоротилися, а розвиток нетрадиційних джерел енергії, як-от сланцева нафта і газ у США, викликав екологічні дискусії.

Події останнього десятиліття — пандемія COVID-19, геополітичні конфлікти та зміна клімату — ще більше актуалізували питання енергетичної стійкості та переходу до відновлюваних джерел енергії. Особливо помітною стала криза 2022 року, яка активізувала розвиток технологій зберігання енергії та впровадження альтернативних рішень у всьому світі.

Ця енергетична ретроспектива пояснює, чому розвиток охолоджувальних систем у тепличному господарстві поступово зміщувався в бік більш стійких та ресурсоефективних технологій. Під тиском постійних викликів, спричинених дефіцитом енергії, виробники тепличного обладнання почали активно впроваджувати відновлювані джерела енергії та рішення, що дозволяють знизити споживання ресурсів і зменшити вплив на довкілля.

Виконане бібліометричне дослідження дозволяє прослідкувати основні етапи еволюції охолоджувальних систем у теплицях — від ранніх пасивних рішень до сучасних гібридних і високотехнологічних підходів. Однак варто враховувати обмеження такого аналізу: орієнтація на кількість цитувань зазвичай надає перевагу старішим джерелам. Тому для більш повної картини додатково було розглянуто сучасні розробки та інноваційні підходи.

У 1970–1980-х роках охолодження теплиць здебільшого базувалося на пасивних рішеннях: природній вентиляції та затінюванні. Ці методи були недорогими та простими, однак сильно залежали від погодних умов.

Запровадження механічного випарного охолодження у 1990-х стало важливим кроком уперед, хоч і супроводжувалося зростанням енергоспоживання та витрат на обслуговування. У 2000-х роках з'явилася можливість комп'ютерного моделювання (CFD), що дозволило оптимізувати роботу систем охолодження. Однак ці вдосконалення знову актуалізували питання енергоефективності.

Нарешті, у період з 2010 до 2024 року розроблено низку сучасних технологій охолодження: високонапірне туманоутворення, геотермальне охолодження, сонячні системи, матеріали з фазовим переходом (PCM) і комбіновані гібридні рішення. Ці підходи краще адаптовані до умов змінного клімату та відповідають критеріям сталого розвитку, знижуючи залежність від традиційних енергоресурсів і покращуючи екологічну ефективність тепличного виробництва.

Гібридні системи охолодження є важливим інструментом для збереження води та енергії в регіонах із обмеженими ресурсами, однак їх впровадження часто пов'язане зі складними технічними рішеннями та високими експлуатаційними витратами. Попри здатність суттєво покращувати мікроклімат теплиць і зменшувати залежність від традиційних джерел енергії, широке застосування таких систем стримується фінансовими й технічними бар'єрами. Необхідність у спеціалізованій інфраструктурі, складних системах керування та регулярному технічному обслуговуванні призводить до зростання загальних витрат. Крім того, інтеграція кількох технологій охолодження створює додаткові виклики: потрібно забезпечити сумісність компонентів і стабільну роботу в умовах змінного клімату. Тому для визначення доцільності та можливості масштабування гібридних рішень у різних сільськогосподарських умовах потрібен комплексний аналіз усіх чинників.

Це підводить до певного парадоксу: чим досконалішими стають технології охолодження, тим більше вони потребують зовнішніх ресурсів і фінансування. Це викликає занепокоєння щодо довготривалої доступності інновацій і потенційного посилення технологічної нерівності між розвиненими й тими країнами, що розвиваються. Наприклад, застосування штучного інтелекту (AI) та Інтернету речей (IoT) у системах охолодження теплиць хоч і забезпечує суттєве підвищення продуктивності та екологічної сталості, але через високу складність, енерговитратність і значні капіталовкладення така технологія залишається малодоступною для дрібних або ресурсно обмежених господарств.

Для подолання цієї нерівності доцільно запроваджувати програми фінансової підтримки, які сприятимуть впровадженню передових систем охолодження в регіонах з обмеженими ресурсами. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, може підвищити сталий розвиток інтелектуальних систем охолодження. Водночас зростання обсягів даних, які генеруються цими системами, вимагає запровадження надійних заходів кібербезпеки, зокрема шифрування, багатофакторної автентифікації та дотримання норм щодо захисту персональних даних. Розв'язання цих питань дозволить повніше розкрити потенціал AI та IoT для забезпечення сталого управління мікрокліматом у теплицях.

Іншим важливим висновком огляду є необхідність адаптації стратегій охолодження до конкретних кліматичних умов, що забезпечить максимальну ефективність і сталий розвиток. У цьому контексті класифікація клімату за Кеппеном-Гейгером дозволяє структуровано підходити до вибору відповідних рішень. Вона виокремлює п'ять основних типів клімату: тропічний, аридний (сухий), помірний, холодний і полярний.

У вологих регіонах, де надлишок вологи становить головну проблему, слід зосереджуватися на зниженні рівня вологості при мінімальному додатковому зволоженні. До ефективних рішень належать природна вентиляція, десикантні системи осушення повітря та гібридні установки, що поєднують механічне охолодження з осушувачами. Застосування теплових екранів і систем затінення сприяє зниженню температури, обмежуючи надмірну вентиляцію та запобігаючи

накопиченню вологи, що сприяє розвитку грибкових хвороб і знижує врожайність.

Натомість у посушливих регіонах, де поєднуються висока температура та дефіцит води, пріоритет слід надавати ефективному охолодженню з мінімальним використанням води. До ефективних методів належать непряме випарне охолодження, системи туманоутворення з рециклінгом води та накопичувачі теплової енергії. Замкнені системи повторного використання води у поєднанні з випарним охолодженням додатково зменшують водовтрати та підтримують стабільний мікроклімат у теплицях.

Важливу роль у забезпеченні сталого розвитку відіграє також адаптація відновлюваних джерел енергії до специфіки регіонального клімату. Наприклад, сонячні термічні установки ефективно працюють в аридних і субтропічних умовах, тоді як системи з вітровою підтримкою доцільніше використовувати у прибережних районах з постійним вітром. Гібридні підходи дозволяють додатково підвищити ефективність використання ресурсів. Так, у напіваридних регіонах — як-от Південна Іспанія та Марокко — де водні ресурси обмежені, а потреба в охолодженні значна, ефективними є поєднання матеріалів з фазовим переходом, природної вентиляції та затінення. У надзвичайно сухих регіонах, як-от Єгипет чи Близький Схід, необхідні вдосконалені гібридні рішення, що комбінують випарне охолодження з адаптивними технологіями затінення для зниження теплового стресу та стабілізації умов у теплицях.

Регіонально-специфічний аналіз клімату підкреслює важливість адаптації систем охолодження теплиць до місцевих кліматичних умов. Оптимізація таких систем із урахуванням регіональних особливостей дозволяє обирати енергоефективні та сталий розвиток технології, які сприяють гармонійному співіснуванню теплиць із навколишнім середовищем. Водночас ці технологічні рішення мають відповідати принципам водно-енергетично-продовольчого Нексуса, що визнає взаємозв'язок між цими критично важливими ресурсами. Системи охолодження повинні не лише підвищувати енергоефективність, але й сприяти раціональному управлінню водними ресурсами та зміцненню продовольчої безпеки. Такий індивідуальний підхід є не лише більш економічним, а й сприяє екологічній рівновазі, зменшує конфлікти за ресурси й забезпечує стабільну врожайність протягом року. Гармонізація технологій охолодження з унікальними кліматичними характеристиками кожного регіону з урахуванням синергій і компромісів між системами води, енергії та продовольства створює основу для стійких і адаптивних тепличних систем, пристосованих до місцевих умов.

Загалом, цей комплексний огляд стійких систем охолодження теплиць виявляє кілька обмежень та визначає ключові напрямки майбутніх досліджень. Основним недоліком є відсутність всебічних довготривалих досліджень, які б порівнювали ефективність і стійкість різних технологій охолодження з 1970-х років до сьогодні. Більшість досліджень зосереджені на окремих періодах або технологіях, не забезпечуючи цілісного розуміння їх еволюції. Такий фрагментарний підхід упускає можливість комплексного використання

історичних даних для сприяння майбутнім інноваціям. Крім того, дослідження часто ігнорують вплив регіональних кліматичних особливостей на ефективність охолоджувальних систем, що підкреслює потребу у клімато-специфічних дослідженнях. Визнання історичного контексту й розвитку різних технологій охолодження є важливим для визначення кращих практик і сфер, які потребують удосконалення. Детальний аналіз минулих інновацій може стати ключем для ефективного напрямку майбутніх розробок.

Крім того, охолоджувальні методи повинні бути адаптовані до регіональних кліматичних умов, щоб підвищити їхню ефективність і стійкість, що вимагає регіонально орієнтованих досліджень. Такі дослідження є важливими для розробки локальних стратегій, які ефективно реагують на унікальні кліматичні виклики. Хоча прогрес у розвитку окремих технологій очевидний, наявні дослідження недостатньо охоплюють їх інтеграцію з іншими сталими практиками тепличного господарства, зокрема водозбереженням і енергоменеджментом, для створення цілісного підходу. Інтегровані стратегії, що поєднують охолодження із сталим використанням ресурсів, є необхідними для формування ресурсоефективних тепличних середовищ.

Наприклад, інтеграція систем охолодження з використанням очищених стічних вод замість прісної води та застосування відновлюваних джерел енергії можуть суттєво підвищити сталий розвиток теплиць. Використання очищених стічних вод сприяє збереженню прісних ресурсів, особливо в регіонах із дефіцитом води, тоді як відновлювані джерела енергії, такі як сонце чи вітер, знижують залежність від викопних палив та скорочують викиди парникових газів. Такий інтегрований підхід відповідає принципам циркулярної економіки, що базується на повторному використанні водних ресурсів та застосуванні відновлюваної енергії.

Досягнення Цілей сталого розвитку через впровадження стійких систем охолодження теплиць вимагає комплексного підходу, який інтегрує енергоефективність, сталий водокористування та політичну підтримку. Зокрема, застосування сонячних та гібридних охолоджувальних технологій може значно знизити залежність від викопних джерел енергії, тим самим зменшуючи викиди парникових газів і експлуатаційні витрати, водночас забезпечуючи сталий аграрний виробництво. Окрім того, підвищення сталості водокористування є критично важливим: заміна прісної води очищеними стічними чи альтернативними джерелами у процесах охолодження сприяє зниженню тиску на водні ресурси.

Водночас розвиток інноваційних технологій, таких як матеріали з фазовим переходом та геотермальні системи, може сприяти масштабованості й доступності рішень. Паралельно цільові навчальні програми для фермерів щодо стійких систем охолодження теплиць, а також фінансові стимули — субсидії, податкові пільги та системи карбонових кредитів — сприятимуть широкому впровадженню цих технологій.

Водночас значні проблеми залишаються в країнах, що розвиваються, де фінансові обмеження, нестабільність енергопостачання та високі початкові

інвестиції гальмують впровадження технологій серед малих та середніх господарств. Для розв'язання цих викликів необхідно комплексно оцінювати загальні життєві цикли технологій, враховуючи витрати на встановлення, експлуатацію та довгострокову економію енергії, що дозволить об'єктивно визначити їхню вартість.

Гібридні системи, які інтегрують кілька джерел енергії, можуть підвищити стійкість у регіонах із нестабільними енергомережами, проте досліджень їхньої ефективності за різних умов енергопостачання поки недостатньо. Аналіз співвідношення «витрати-вигоди» та довгострокових економічних переваг допоможе сприяти ширшому впровадженню, особливо в країнах із обмеженими можливостями інвестування у сільське господарство.

Іншою проблемою є модернізація існуючих теплиць для інтеграції сучасних систем охолодження, оскільки більшість досліджень зосереджені на нових спорудах. Розробка адаптивних і масштабованих рішень для оновлення традиційних теплиць, особливо в регіонах із низьким рівнем доходів, могла б підвищити доступність і сталий розвиток.

Також, хоча короткострокові показники енергозбереження і ефективності охолодження широко вивчені, існує брак довгострокових досліджень, присвячених довговічності матеріалів, стабільності систем і екологічному впливу. Тривалість служби матеріалів з фазовим переходом, довговічність гібридних систем та їхня економічна стійкість потребують додаткового вивчення.

Для подолання цих прогалин майбутні дослідження мають зосередитися на клімато-специфічних адаптаціях, забезпечуючи, щоб охолоджувальні технології відповідали різноманітним регіональним умовам. Важливим є також розширення уваги до ролі державної політики, субсидій і фінансових стимулів у підтримці інновацій у сфері охолодження теплиць.

Нарешті, розширення знань про соціальні, економічні та екологічні наслідки охолоджувальних систем теплиць через соціальні, економічні та оцінки життєвого циклу, особливо в країнах, що розвиваються, буде ключовим кроком для визначення масштабованих і сталих рішень. Усунення цих прогалин дозволить створити доступні, економічно вигідні та стійкі стратегії охолодження теплиць, які сприятимуть довготривалій продовольчій безпеці та екологічній стійкості у різних глобальних контекстах.

4.3 ТЕХНОЛОГІЯ СЕНСОРНИХ ДАТЧИКІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПОМІДОРІВ У ТЕПЛИЦЯХ: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД

Особливе місце в тепличній галузі займає вирощування томатів — найпоширенішої тепличної культури у світі. Тепличні томати вирізняються високою економічною ефективністю, харчовою цінністю та придатністю до технологічних інновацій. Їх добре вивчена фізіологія, виражені реакції на умови середовища й короткий вегетаційний період роблять цю культуру зручною для

експериментального впровадження новітніх сенсорних технологій та систем управління.

Водночас вирощування томатів супроводжується низкою викликів — від захворювань і шкідників до високих вимог до якості продукції й ресурсозабезпечення. Ці проблеми притаманні тепличному овочівництву загалом, тому ефективні рішення, розроблені для томатів, можуть бути адаптовані для інших культур.

На жаль, традиційне управління тепличним виробництвом часто базується на емпіричних підходах, які не забезпечують своєчасного реагування на зміни мікроклімату та просторову нерівномірність. Це призводить до перевитрати ресурсів, зниження ефективності та негативного впливу на довкілля. Наприклад, у деяких країнах рівень енергоспоживання в теплицях у кілька разів перевищує оптимальні показники. Нераціональне живлення, особливо щодо балансу азоту, фосфору й калію, погіршує ріст і розвиток рослин, а також негативно впливає на навколишнє середовище.

Ефективне управління сучасною теплицею неможливе без сенсорних технологій, які забезпечують оперативне отримання даних про параметри середовища й стан рослин. Історія розвитку цих технологій демонструє перехід від ручного спостереження до автоматизованих систем, зокрема бездротових сенсорних мереж, цифрової візуалізації, а згодом — інтеграції Інтернету речей та аналітики великих даних. Такі системи дають змогу формувати цифрові профілі стану рослин і приймати обґрунтовані рішення в режимі реального часу.

Однак аналіз даних з одного джерела має обмеження. Тому дедалі більшої популярності набуває підхід мультисенсорного збору інформації з подальшою обробкою даних за допомогою штучного інтелекту. Технології глибокого навчання демонструють високу точність при роботі зі складними аграрними сценаріями. Поєднання інформації з різних сенсорів з алгоритмами ШІ забезпечує комплексне уявлення про фізіологію рослин і мікроклімат, сприяє підвищенню врожайності, ефективнішому використанню ресурсів та підвищенню стійкості тепличних систем.

4.3.1. Вплив екологічних параметрів на ріст томатів

Екологічні параметри — зокрема температура, вологість, інтенсивність освітлення та концентрація CO₂ — відіграють ключову роль у формуванні росту, розвитку та якості врожаю томатів у тепличних умовах. Вони безпосередньо впливають на фізіологічні та біохімічні процеси в рослинах, визначаючи ефективність фотосинтезу, накопичення біомаси та загальний стан культури. У цьому розділі розглянуто вплив основних екологічних факторів — температури, водозабезпечення, освітлення та газообміну — на продуктивність тепличних томатів, з акцентом на необхідність їх оптимізації для досягнення стабільної врожайності та високої якості плодів.

4.3.1.1. Температура та водозабезпечення

Температурні умови та водний режим є визначальними екологічними факторами, що суттєво впливають на ріст і розвиток томатів у теплицях. Рослини

томату чутливі до коливань температури — як перегрів, так і переохолодження негативно впливають на їх фізіологічні процеси. Водночас водний режим тісно пов'язаний із температурою, оскільки ці фактори разом регулюють процес фотосинтезу та накопичення органічної речовини.

Стресові умови, спричинені високою температурою або дефіцитом вологи, знижують фотосинтетичну ефективність, що призводить до зменшення поглинання вуглецю та зниження продуктивності. За умов посухи рослини замикають продихи для зменшення втрати води, однак це обмежує надходження CO₂ та, відповідно, знижує інтенсивність фотосинтезу. Найбільш критичним є поєднання температурного та водного стресу, що поглиблює негативний вплив на фізіологію рослин.

Зменшення фотосинтетичної активності в умовах стресу пов'язане з порушеннями у транспорті електронів у фотосистемі II (PSII) та зниженням ефективності засвоєння CO₂. Висока температура може пошкоджувати структуру PSII, що призводить до накопичення надлишкової світлової енергії та утворення активних форм кисню, викликаючи фотострес. Аналогічно, водний дефіцит обмежує електронний транспорт через зменшення кількості реакційних центрів у PSII та зниження активності кисневого еволюційного комплексу. Крім того, за обох типів стресу знижується активність ферментів циклу Кальвіна, зокрема RuBisCO, що обмежує швидкість фіксації CO₂.

Важливу роль у цих процесах відіграють продихи — вони регулюють водний обмін і надходження CO₂ у листки, реагуючи на зміни температури та вологості. Ступінь відкритості продихів характеризується величиною провідності (g_s), яку можна описати рівнянням:

$$g_s = g_0 + \alpha \cdot A_n \cdot \frac{RH}{C_s - \Gamma^*}$$

Де:

- g_0 — базова провідність продихів;
- α — емпіричний коефіцієнт;
- A_n — чиста швидкість фотосинтезу;
- RH — відносна вологість повітря;
- C_s — концентрація CO₂ на поверхні листка;
- Γ^* — точка компенсації CO₂.

Це рівняння свідчить про те, що підвищення температури й дефіцит вологи знижують провідність продихів, обмежуючи надходження вуглекислого газу й пригнічуючи фотосинтез.

Ще одним ключовим показником стану водозабезпечення рослин є водний потенціал листка (Ψ), який суттєво залежить від температури, вологості повітря та потенціалу ґрунтової вологи (Ψ_s). Високі температури підвищують інтенсивність транспірації, тоді як дефіцит ґрунтової вологи обмежує водопостачання від коренів до листків, знижуючи Ψ .

Водний потенціал листка (Ψ) залежить від багатьох факторів і може бути описаний рівнянням:

$$\Psi = \Psi_s - \frac{E}{L} \cdot \frac{1}{1 - RH} \cdot \rho \cdot \lambda \cdot (T + 273,15)$$

де:

- Ψ_s — водний потенціал ґрунту;
- E — інтенсивність транспірації;
- L — гідравлічна провідність;
- RH — відносна вологість повітря;
- ρ — густина води;
- λ — прихована теплота випаровування;
- T — температура повітря в $^{\circ}\text{C}$.

Зниження водного потенціалу листка призводить до закриття продихів, скручування листків і зменшення фотосинтетично активної площі, що, у свою чергу, обмежує продуктивність рослин.

Крім того, транспортування продуктів фотосинтезу (насамперед сахарози) також значною мірою залежить від температури й водозабезпечення. Синтезована в процесі фотосинтезу сахароза має бути завантажена у флоему, транспортуватися до органів-акцепторів (плодів) і розвантажена там. Високі температури можуть пригнічувати експресію генів, відповідальних за синтез і транспорт сахарози, знижуючи здатність рослини до ефективного переміщення вуглеводів. Водночас дефіцит вологи зменшує гідравлічну провідність флоєми та ксилеми, що також ускладнює переміщення продуктів фотосинтезу. Як наслідок, знижується врожайність і якість томатів, зокрема через зменшення вмісту розчинних цукрів.

4.3.1.2. Освітлення та газообмін

Світло є основним джерелом енергії для фотосинтезу в рослинах томату. Як інтенсивність, так і спектральний склад світла мають визначальний вплив на ефективність фотосинтезу й формування врожаю. Під час росту томати здійснюють газообмін із навколишнім середовищем: поглинають CO_2 і втрачають воду шляхом транспірації. У цьому процесі ключову роль відіграє провідність продихів.

Фотосинтетична відповідь томатів на зміну інтенсивності освітлення відбувається у два етапи:

- Фаза обмеження світлом, коли інтенсивність фотосинтезу зростає лінійно зі збільшенням освітлення.
- Фаза насичення світлом, коли рівень фотосинтезу досягає плато — подальше підвищення рівня фотосинтетично активної радіації (PAR) вже не спричиняє зростання фотосинтетичної активності.

Залежність між швидкістю фотосинтезу (P_n) та фотосинтетично активною радіацією (PAR) можна описати за допомогою рівняння неректангулярної гіперболи:

$$P_n = \alpha \cdot PAR + P_{max} - \frac{\sqrt{(\alpha \cdot PAR + P_{max})^2 - 4\theta \cdot \alpha \cdot PAR \cdot P_{max}}}{2\theta} - R_d$$

де:

- α — квантоєфективність (apparent quantum efficiency);
- P_{max} — максимальна швидкість фотосинтезу;
- θ — фактор кривизни (curvature factor);
- R_d — швидкість дихання в темряві (dark respiration rate).

Це рівняння дозволяє врахувати як ефективність засвоєння світлової енергії, так і насичення фотосинтетичних процесів за високої інтенсивності освітлення, що є надзвичайно важливим при моделюванні фотосинтетичної активності в тепличних умовах.

4.3.1.2 Світло та газообмін

Світло є основним джерелом енергії для фотосинтезу в томатів. Інтенсивність та спектральний склад світла мають вирішальне значення для ефективності фотосинтезу й формування врожаю. Під час вегетації рослини також здійснюють газообмін із навколишнім середовищем, поглинаючи CO₂ та втрачаючи воду в процесі транспірації, де ключову роль відіграє поведінка продихів.

Фотосинтетична відповідь листків томата на зміну інтенсивності освітлення має дві фази: фазу обмеження світлом і фазу насичення. У першій фазі швидкість фотосинтезу зростає прямо пропорційно до збільшення інтенсивності освітлення. У другій фазі, коли рівень фотосинтетично активного випромінювання перевищує точку насичення, фотосинтетична активність досягає плато й надалі не зростає.

Для опису цієї залежності між швидкістю фотосинтезу (P_n) та фотосинтетично активним випромінюванням (PAR) використовується рівняння гіперболи зі згладженою вершиною:

$$P_n = \frac{\alpha \cdot PAR + P_{max} - \sqrt{(\alpha \cdot PAR + P_{max})^2 - 4 \cdot \theta \cdot \alpha \cdot PAR \cdot P_{max}}}{2\theta} - R_d$$

Де: α — квантовий вихід фотосинтезу, P_{max} — максимальна швидкість фотосинтезу, θ — фактор кривизни, R_d — темнове дихання.

Інтенсивність освітлення повинна регулюватися відповідно до стадій росту рослин, щоб уникати фотоінгібіції. Дослідження показують, що оптимальна інтенсивність для розсади томатів становить близько 400 мкмоль/(м²·с), що відповідає умовам типових теплиць.

Спектральний склад світла також значною мірою впливає на фотосинтез і морфогенез томатів. Хлорофіл в основному поглинає червоне (600–700 нм) та синє (400–500 нм) світло, тоді як каротиноїди поглинають переважно синє.

Сучасні LED-джерела світла з певними спектральними комбінаціями можуть покращити фотосинтетичну ефективність та накопичення сухої маси. Наприклад, червоно-синє освітлення у співвідношенні 4:1 сприяє відкриттю продихів, підвищенню швидкості фотосинтезу та ефективності використання води. Додавання зеленого (500–600 нм) і далекого червоного (700–800 нм) світла сприяє видовженню стебел і підвищенню врожайності. Часткова заміна червоного світла на зелене може стимулювати ріст листя та пагонів, не знижуючи фотосинтетичну ефективність.

Крім регуляції водного обміну, продихи відповідають і за поглинання CO_2 . Середня продихова провідність дозволяє рослині ефективно засвоювати вуглекислий газ, підтримуючи високу фотосинтетичну продуктивність. Надмірна ж продихова провідність призводить до втрати великої кількості води, що погіршує ефективність її використання.

Для кількісної оцінки впливу навколишнього середовища на продихову провідність (g_s) використовується модель Болла-Беррі:

$$g_s = g_0 + k \cdot \frac{A_n \cdot RH}{C_s}$$

де g_0 і k — емпіричні коефіцієнти, A_n — чиста фотосинтетична швидкість, RH — відносна вологість повітря, C_s — концентрація CO_2 на поверхні листка.

Згідно з моделлю, підвищення інтенсивності освітлення, збільшення вмісту CO_2 , зниження температури й підвищення вологості повітря сприяють зростанню продихової провідності. Водночас потрібно уникати надлишкового відкриття продихів, щоб не допустити надмірного випаровування.

У тепличному вирощуванні томатів важливе значення має CO_2 -добриво, що підвищує фотосинтетичну активність. Оптимальний рівень CO_2 для розвитку рослин становить 600–1200 мкмоль/моль. Проте концентрації понад 1200 мкмоль/моль можуть викликати часткове закриття продихів і зменшення їх провідності на 10–70 %.

Продихова провідність та фотосинтетична активність неоднорідно розподілені в межах томатного намету: листки верхнього ярусу мають вищу продуктивність завдяки кращій освітленості, більшій щільності продихів та ширшим їхнім отворам. Тому при регулюванні мікроклімату в теплиці доцільно враховувати потреби всіх ярусів, забезпечуючи рівномірність умов і запобігаючи утворенню зон із надмірною чи недостатньою температурою та вологістю.

4.3.1.3 Інші параметри, що впливають на вирощування томатів

Окрім температури, води, світла, вуглекислого газу та вологості повітря, важливу роль у рості та формуванні врожаю томатів у тепличному господарстві відіграють також поживні речовини ґрунту та агротехнічні прийоми. Ефективне управління потребує комплексної регуляції всіх цих факторів для забезпечення оптимальних умов вирощування.

Ґрунтове живлення має вирішальне значення для розвитку томатів, адже рослини потребують як макроелементів (азот, фосфор, калій), так і

мікроелементів (залізо, бор, цинк). Встановлено, що поєднання органічних добавок, таких як біовугілля, з азотними добривами покращує ріст, зав'язування плодів і їх якість. Застосування наноформ заліза позитивно впливає на вміст хлорофілу та смакові показники плодів. Раціональне удобрення повинно базуватись на результатах аналізу ґрунту, діагностиці стану рослин та регіональних особливостях.

Вибір методів удобрення також суттєво впливає на результат. Біоорганічні добрива сприяють покращенню структури ґрунту та розвитку мікробіоти, що підвищує стійкість рослин до стресів. Особливо ефективним вважається комбіноване застосування біодобрив з азотом. Біовуглецеві добрива додатково підвищують стійкість рослин до хвороб.

Вологість повітря впливає на фотосинтез та нагромадження біомаси, опосередковано через регуляцію транспірації. Оптимальний рівень відносної вологості в теплиці становить близько 85%. Надмірна вологість сприяє вегетативному росту, але підвищує ризик захворювань, тоді як занадто низька (<50%) викликає стрес і погіршує формування плодів. Підтримання вологості в межах 60–70% дозволяє уникнути обох крайнощів.

За стресових умов (низькі температура й вологість) у рослин знижується активність кореневої системи та порушується азотний обмін. У таких випадках доцільно застосовувати додаткове освітлення, збільшувати норму азотного удобрення та стимулювати кореневу мікрофлору. Зокрема, використання ризосферних бактерій покращує поглинання води та елементів живлення.

Окремі агротехнічні заходи також сприяють адаптації до несприятливих умов. Застосування затінення дозволяє зменшити транспіраційні втрати без зниження фотосинтетичної активності, а почерговий полив частин кореневої зони покращує водокористування. Томати можуть демонструвати підвищену ефективність водокористування за умов помірного дефіциту води, особливо при підвищеному вмісті CO₂ у повітрі.

Важливим чинником є і правильний вибір сорту. Встановлено, що деякі традиційні сорти мають вищу посухостійкість порівняно з сучасними. Підбір сортів, адаптованих до локальних умов, у поєднанні з відповідною технологією вирощування, є запорукою стабільного та сталого виробництва.

Таким чином, успішне вирощування тепличних томатів потребує інтегрованого підходу до регулювання всіх параметрів, які впливають на фізіологічні процеси. Застосування сучасних сенсорних технологій для моніторингу стану рослин у реальному часі дозволяє реалізувати стратегії «розумного» вирощування на основі точних діагностичних даних.

4.3.2. Огляд сенсорних технологій

4.3.2.1. Технологія екологічного зондування

4.3.2.1.1. Температура та вологість

Температура та вологість повітря є ключовими параметрами мікроклімату теплиці, які безпосередньо впливають на ріст, розвиток та продуктивність томатів. Для ефективного управління цими факторами використовують різні

типи сенсорів, які інтегруються в автоматизовані системи моніторингу та регулювання.

Один із найпоширеніших методів вимірювання температури базується на використанні термопар. Принцип їхньої дії ґрунтується на ефекті Зеєбека — явищі, при якому в замкненому колі з двох різних металів виникає електрорушійна сила в разі різниці температур між двома контактами. Величина напруги визначається за формулою:

$$V = \alpha(T_1 - T_2)$$

де V — напруга, що генерується термопарою; α — коефіцієнт Зеєбека; T_1 і T_2 — температури на двох з'єднаннях металів.

Контроль вологості.

Для визначення відносної вологості найчастіше застосовують ємнісні сенсори. Вони фіксують зміни діелектричної проникності, викликані коливанням вологості повітря. Ємність сенсора змінюється згідно з рівнянням:

$$C = C_0(1 + \alpha_H \cdot RH)$$

де C — загальна ємність сенсора; C_0 — початкова ємність при нульовій вологості; α_H — коефіцієнт чутливості до вологості; RH — відносна вологість у відсотках.

Інтеграція в автоматизовані системи. Використання температурних та вологісних сенсорів у складі бездротових сенсорних мереж (WSN) дає змогу здійснювати моніторинг у реальному часі та автоматично регулювати параметри мікроклімату. Це забезпечує оптимальні умови для росту томатів і сприяє підвищенню якості та врожайності.

Крім того, поєднання сенсорних даних із інтелектуальними алгоритмами глибокого навчання, зокрема моделями типу LSTM (довготривала короткочасна пам'ять), дозволяє не лише фіксувати поточні значення, а й прогнозувати зміни клімату в теплиці. Це відкриває можливості для превентивного керування процесами та адаптивного внесення змін до параметрів вентиляції, обігріву або зволоження.

4.3.2.1.2. Вуглекислий газ (CO_2)

Моніторинг концентрації CO_2 у тепличному середовищі має вирішальне значення для забезпечення ефективного фотосинтезу, контролю мікроклімату та управління ростом рослин. Для цього застосовуються кілька типів сенсорів, що базуються на різних фізико-хімічних принципах дії.

(1) Недисперсійні інфрачервоні (NDIR) сенсори.

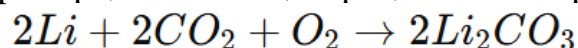
Це найпоширеніша технологія для визначення вмісту CO_2 . Принцип роботи базується на здатності молекул CO_2 поглинати інфрачервоне випромінювання на довжині хвилі приблизно 4,26 мкм. Сенсор складається з інфрачервоного джерела, камери для зразка, світлофільтра та приймача. Концентрація CO_2 визначається за ступенем поглинання випромінювання згідно з рівнянням:

$$I = I_0 \cdot \exp(-k \cdot c \cdot d)$$

де I — інтенсивність світла після проходження крізь зразок, I_0 — початкова інтенсивність, k — коефіцієнт поглинання, c — концентрація CO_2 , d — довжина оптичного шляху.

(2) Електрохімічні сенсори.

Такі сенсори працюють на основі електрохімічної реакції, яка генерує електричний струм, пропорційний концентрації CO_2 . Наприклад:



Вимірювання сили струму або напруги між електродами дозволяє кількісно визначити концентрацію CO_2 за допомогою калібрувальних кривих.

(3) Фотоакустичні сенсори (PAS).

Ці пристрої виявляють акустичні хвилі, що утворюються під дією світлового випромінювання, яке поглинається молекулами CO_2 . PAS-сенсори характеризуються високою чутливістю й здатні виявляти концентрації на рівні частин на мільярд (ppb).

(4) Твердотільні сенсори.

Серед них — сенсори на основі метал-оксидних напівпровідників (MOS), які реагують на зміну електричного опору в результаті адсорбції CO_2 . Основними перевагами таких сенсорів є компактність і низьке енергоспоживання, хоча стабільність і вибірковість потребують вдосконалення.

Порівняння технологій.

NDIR-сенсори вирізняються високою точністю та стабільністю, тому найчастіше використовуються в тепличному господарстві. Електрохімічні сенсори мають компактні розміри та енергоефективність, але поступаються точністю. PAS-технології забезпечують надзвичайно високу чутливість, однак є дорогими. Твердотільні сенсори — дешеві та малі за розмірами, але обмежені з точки зору довготривалої надійності.

Застосування у виробництві тепличних томатів.

Сенсори CO_2 широко використовуються для:

- Оптимізації фотосинтезу. Кероване збагачення повітря CO_2 дозволяє підвищити врожайність томатів до 50% і покращити їхні поживні властивості.
- Регулювання середовища. Інтеграція CO_2 -сенсорів із сенсорами температури, вологості та освітленості сприяє комплексному керуванню мікрокліматом.
- Оцінки фізіологічного стану. CO_2 використовується для моніторингу інтенсивності фотосинтезу та дихання, а також для діагностики захворювань за змінами в метаболізмі листя.
- Контролю післязбирального зберігання. Портативні ІЧ-спектрометри, які вимірюють CO_2 , допомагають підтримувати оптимальні умови зберігання та продовжити термін придатності продукції.

Поєднання CO_2 -сенсорів з іншими типами датчиків у складі інтернету речей (IoT) забезпечує високоточне управління умовами середовища, дозволяючи збільшити врожайність і покращити якість продукції. Крім того,

комбінація контрольованого збагачення CO₂ та дозованого внесення добрив сприяє кращому засвоєнню азоту та підвищенню якості плодів.

4.3.2.1.3. Освітлення

Освітлення є ключовим фактором, що впливає на ріст та розвиток томатів у тепличному середовищі. Для моніторингу світлових умов застосовуються різні типи сенсорів: квантові, фотодіоди, кремнієві сенсори та фоторезистори. Квантові сенсори, які функціонують на основі фотоелектричного ефекту, є одними з найпоширеніших завдяки здатності точно визначати фотосинтетично активне випромінювання (PAR). PAR вимірюється в межах спектру 400–700 нм і має одиниці виміру $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{с})$.

Інші типи сенсорів, як-от фотодіоди та фоторезистори, застосовуються для оцінки інтенсивності світла у люксах або $\text{Вт}/\text{m}^2$. Вони можуть використовуватись як для моделювання природного освітлення, так і для порогового керування. Хоча фоторезистори мають високу чутливість, їх точність обмежена через низьку лінійність.

Світлові сенсори у теплицях виконують три основні функції: моніторинг середовища, оптимізація енергоспоживання та діагностика росту рослин. Вони дозволяють адаптувати штучне освітлення до фаз розвитку культури, а також прогнозувати освітлювальні потреби за даними метеорологічних умов. Інтеграція з іншими сенсорами та методами штучного інтелекту дозволяє забезпечити енергоефективне керування мікрокліматом теплиці. Новітні розробки включають роботизовані системи для тривимірного картування освітленості, що підвищує точність аналізу умов освітлення на рівні рослинного покриву.

4.3.2.2. Технології сенсорного контролю фізіологічних параметрів рослин

Сенсори фізіологічних параметрів рослин забезпечують моніторинг стану та розвитку томатів у реальному часі без пошкодження рослини. Сучасні технології включають RGB-зображення, мультиспектральну зйомку, флуоресценцію хлорофілу та оптичні волокна. Їх поєднання дозволяє здійснювати точне управління процесами вирощування та своєчасну діагностику порушень.

4.3.2.2.1. RGB-зображення

RGB-камери — один із найбільш доступних і простих способів моніторингу стану томатів. Вони формують зображення в трьох спектральних діапазонах: червоному, зеленому та синьому. RGB-зображення дають змогу оцінити форму, колір, розміри, а також виявити відхилення в розвитку рослин. Завдяки цифровій обробці зображень можна визначати висоту, ширину крони, кут нахилу листків тощо.

Цей метод також ефективний для виявлення хвороб, оцінювання якості плодів (колір, текстура, твердість), а також для діагностики дефіциту макроелементів за кольором листя. Попри обмежену спектральну чутливість та залежність від освітлення, RGB-камери залишаються затребуваним

інструментом завдяки своїй доступності та простоті експлуатації. Для підвищення ефективності дослідники комбінують RGB-камери з мультиспектральними сенсорами, що дозволяє більш точно ідентифікувати проблеми на ранніх етапах розвитку рослин.

Завдяки розвитку комп'ютерного зору та алгоритмів штучного інтелекту, застосування RGB-зображень у тепличному господарстві продовжує розширюватися — від автоматизованого моніторингу росту до систем підтримки прийняття рішень у точному землеробстві

4.3.2.2.4. Оптичні волоконні сенсори

Оптичні волоконні сенсори вирізняються високою чутливістю, стійкістю до електромагнітних завад і можливістю дистанційного та розподіленого моніторингу. У тепличному овочівництві вони виявили значний потенціал для контролю за мікрокліматом і конструкціями теплиць. Особливо перспективними є сенсори на основі Брега-граток (FBG), що дозволяють точно вимірювати зміни температури або деформації. Принцип їх роботи полягає у відбитті певних довжин світлової хвилі внаслідок періодичних змін показника заломлення в серцевині волокна. Зміна зовнішніх умов викликає зсув відбитої довжини хвилі, що й використовується для вимірювання.

У тепличному вирощуванні томатів FBG-сенсори можуть інтегруватися у пристрої для безконтактного моніторингу стану рослин, зокрема для відстеження їхнього росту, деформацій стебла та реакції на зміни середовища. Такі системи дозволяють фіксувати найменші зміни у фізіологічному стані рослин. Крім того, волоконно-оптичні технології використовуються для просторового моніторингу вологості ґрунту, що сприяє точному управлінню зрошенням.

Втім, попри численні переваги, широке впровадження оптичних сенсорів у середніх та малих господарствах обмежується високою вартістю обладнання та потребою у спеціалізованому технічному обслуговуванні. Також викликом залишається обробка великих обсягів отриманих даних.

4.3.2.3. Узагальнення та порівняння

Безконтактні сенсорні технології відіграють ключову роль у сучасному тепличному виробництві томатів. Вони забезпечують точний моніторинг фізіологічного стану рослин, умов довкілля, діагностику захворювань, оцінку живлення та виявлення стресових факторів. Комплексний аналіз таких технологій свідчить про їх високу ефективність та перспективність, зокрема в умовах автономних теплиць. Майбутній розвиток зосереджуватиметься на об'єднанні даних з різних джерел, удосконаленні інтелектуальних алгоритмів, мініатюризації пристроїв, зниженні вартості та стандартизації рішень для масового використання. Водночас, проблеми інтеграції даних, вартості обладнання та впровадження технологій залишаються актуальними.

Завдяки розвитку IoT, 5G-зв'язку та обчислень на периферії, безконтактні сенсори все активніше впроваджуються у цифрові агросистеми, сприяючи переходу до високоточних, сталих та ефективних моделей виробництва.

4.3.2.4. Інтеграція з IoT та бездротовими сенсорними мережами

Поєднання сенсорних технологій із мережами IoT та WSN (бездротовими сенсорними мережами) дало змогу підвищити точність та оперативність моніторингу стану рослин і параметрів мікроклімату в теплицях. Такі системи забезпечують синхронний збір та обробку даних із різних сенсорів у режимі реального часу, створюючи цілісне уявлення про взаємодію між рослиною та середовищем.

Інтеграція сенсорів фізіології рослин і середовища через WSN дозволяє здійснювати вимірювання з високою частотою, виявляти реакції рослин на коливання умов та суттєво зменшувати споживання енергії в порівнянні з традиційними методами контролю.

Новітні інтеграційні платформи поєднують сенсори росту, мікроклімату та роботизовані мобільні комплекси, що рухаються між рослинами. Це дозволяє одночасно контролювати площу листової поверхні, товщину стебла та температуру середовища. Такі рішення демонструють високу точність виявлення стадій росту та ранніх ознак фізіологічного стресу.

Зокрема, комбінація флуоресценції хлорофілу та спектральних даних дозволяє з високою точністю ідентифікувати стресові стани на ранніх етапах. Інтегровані вимірювання температури та газообміну дозволяють прогнозувати фотосинтетичну активність рослин. Автоматизовані системи з використанням нейронних мереж, багатоаспектні системи оцінки стресу та адаптивні алгоритми збору даних відкривають нові можливості для інтелектуального управління тепличним виробництвом томатів.

Такі інноваційні підходи суттєво поглиблюють розуміння фізіологічних процесів у рослинах та створюють реальні інструменти для підвищення ефективності вирощування.

4.3.3. Технології об'єднання даних з кількох сенсорів

З огляду на складність і варіативність аграрного середовища, дані лише одного сенсора часто є недостатніми для повноцінної оцінки стану росту рослин. Технології об'єднання даних з кількох сенсорів (multi-sensor data fusion) дозволяють інтегрувати та аналізувати гетерогенні дані, зібрані різними сенсорами, виявляючи приховані закономірності й забезпечуючи глибше розуміння фізіологічних процесів у рослинах та стану навколишнього середовища. Це дає змогу отримати більш точну, надійну й комплексну інформацію про процеси росту сільськогосподарських культур.

4.3.3.1. Принципи об'єднання даних

Технології об'єднання даних з кількох сенсорів ґрунтуються на автоматизованому аналізі та синтезі інформації, отриманої з різних джерел. Це дозволяє зменшити рівень невизначеності, усунути надмірність інформації та підвищити точність і надійність прийняття рішень. Серед поширених методів об'єднання даних — фільтр Калмана, байєсівський висновок, теорія доказів Демпстера-Шейфера та нечітка логіка.

Фільтр Калмана широко використовується для обробки даних часових рядів, дозволяючи рекурсивно оцінювати стан динамічної системи. Цей метод

ефективно поєднує прогнози та вимірювання, що особливо цінно для моніторингу таких параметрів, як температура чи вологість у тепличних умовах.

Байєсівський підхід дає змогу обчислювати ймовірності на основі попередніх знань і нових даних. Це особливо корисно для аналізу невизначених ситуацій, зокрема при прогнозуванні розвитку рослин або виникнення хвороб.

Існує три рівні об'єднання даних:

- На рівні даних – безпосереднє поєднання сирих даних до обробки;
- На рівні ознак – попереднє вилучення ознак з кожного джерела і подальше об'єднання;
- На рівні рішень – окреме оброблення кожного джерела з подальшим комбінуванням результатів.

Кожен рівень має свої переваги щодо складності, гнучкості та здатності враховувати зв'язки між сенсорами.

4.3.3.2. Алгоритми об'єднання даних

Алгоритми мультисенсорного об'єднання можна поділити на три основні категорії: традиційні статистичні, ймовірнісні та методи штучного інтелекту.

Традиційні методи, такі як зважене середнє, прості у реалізації, проте вибір ваг часто є суб'єктивним, що обмежує застосування в складних умовах. Фільтр Калмана ефективно працює в умовах лінійних систем із нормально розподіленими шумами, забезпечуючи точний контроль параметрів середовища.

Байєсівські методи дають змогу враховувати попередні знання та адаптуватися до нових даних. Вони є корисними для оцінки стану росту томатів або раннього попередження щодо хвороб і шкідників. Теорія Демпстера-Шейфера дозволяє обробляти неповну інформацію, але має високу обчислювальну складність при великому обсязі даних.

Методи штучного інтелекту все активніше використовуються в об'єднанні даних. Нечітка логіка добре підходить для прийняття рішень в умовах невизначеності, наприклад, у системах підтримки рішень щодо зрошення. Нейронні мережі здатні моделювати складні нелінійні зв'язки. Наприклад, поєднання згорткових нейронних мереж з методами машинного навчання дозволяє точно оцінювати якість і ступінь зрілості плодів. Глибоке навчання, зокрема моделі типу LSTM, забезпечує обробку часових рядів сенсорних даних і дозволяє автоматично виділяти ознаки.

4.3.3.3. Приклади застосування

Технології об'єднання даних з кількох сенсорів знаходять широке застосування в розумному управлінні тепличним вирощуванням томатів:

Контроль мікроклімату теплиць — поєднання даних про температуру, вологість, освітленість та концентрацію CO₂ дозволяє в режимі реального часу керувати умовами вирощування, що сприяє підвищенню врожайності.

Моніторинг росту та прогнозування врожайності — об'єднання супутникових та дронівих знімків забезпечує точні оцінки вегетаційних індексів та обсягів майбутнього врожаю.

Управління хворобами та шкідниками — аналіз спектральних, флуоресцентних та теплових зображень у поєднанні з параметрами середовища дозволяє виявляти захворювання на ранніх стадіях з високою точністю.

Оцінка якості плодів — застосування гіперспектральної та ближньої інфрачервоної спектроскопії дає змогу безконтактно оцінювати якість плодів, зокрема вміст сухих речовин.

Управління водопостачанням та живленням — моніторинг вологості ґрунту, випаровування та рівня поживних речовин сприяє точному зрошенню та удобренню, оптимізуючи використання ресурсів.

Крім того, перспективними є стратегії управління, що враховують інтегровані показники стану рослин, ґрунту та атмосфери. З розвитком IoT, великих даних і штучного інтелекту, інтелектуальні системи моніторингу та діагностики на основі мультисенсорного об'єднання набувають дедалі більшого поширення, забезпечуючи сталий розвиток сучасного тепличного виробництва томатів.

4.3.4. Технології штучного інтелекту для інтелектуальної діагностики томатів

Технології штучного інтелекту (ШІ) відіграють дедалі важливішу роль у сучасному тепличному овочівництві, зокрема у виробництві томатів. Завдяки здатності до високошвидкісної обробки великих обсягів складної інформації, ШІ забезпечує ефективну підтримку процесів діагностики фізіологічного стану рослин, виявлення хвороб і шкідників, а також прогнозування розвитку та врожайності культури.

Моделі штучного інтелекту дозволяють ідентифікувати потреби рослин на основі аналізу середовища вирощування, що сприяє підвищенню точності агротехнічних рішень і, як наслідок, — зростанню загального обсягу виробництва.

У цьому розділі представлено узагальнення методів, що застосовуються для діагностики стану томатів, зокрема традиційних моделей машинного навчання, алгоритмів глибокого навчання та комбінованих (ансамблевих) методів.

4.3.4.1. Традиційні моделі машинного навчання

У задачах діагностики стану томатів традиційні алгоритми машинного навчання мають велике значення, особливо коли йдеться про обробку структурованих даних або роботу з обмеженими обсягами вибірки.

4.3.4.1.1. Метод опорних векторів (SVM)

Метод опорних векторів дозволяє розділяти дані, формуючи оптимальну гіперплощину у багатовимірному просторі ознак. Його головна ідея полягає в максимізації відстані між класами. SVM успішно застосовується для класифікації захворювань листя томатів і для оцінки якості плодів. Наприклад, Цзен та його колеги запропонували безконтактний метод визначення ступеня зрілості плодів томатів, що ґрунтувався на поєднанні SVM та спектроскопії у

ближньому інфрачервоному діапазоні. Такий підхід забезпечив високу точність результатів — понад 95%.

4.3.4.1.2. Випадковий ліс (Random Forest)

Алгоритм «випадковий ліс» є методом ансамблевого навчання, який базується на побудові множини дерев рішень і поєднанні їхніх результатів для підвищення загальної точності. Цей метод особливо ефективний при роботі з великою кількістю ознак і складними нелінійними залежностями. Басавайя та Арлін Ентоні застосували Random Forest у поєднанні з характеристиками спектрального відбиття листя і параметрами хлорофільної флуоресценції для ранньої діагностики захворювань томатів. Їх модель успішно розпізнавала сіру гніль, фітофтороз та борошнисту росу з точністю 94%, перевершуючи як окремі дерева рішень, так і метод SVM.

4.3.4.2. Моделі глибокого навчання

Глибокі нейронні мережі, побудовані на багаторівневій архітектурі, здатні самостійно вивчати складні ієрархії ознак, що робить їх надзвичайно ефективними у завданнях діагностики фізіологічного стану томатів та моніторингу впливу навколишнього середовища. Такі моделі дозволяють напряду обробляти великі обсяги «сирих» даних — наприклад, спектральні зображення або часові ряди з сенсорів — для точної оцінки росту, потреб у живленні чи наявності захворювань.

4.3.4.2.1. Згорткові нейронні мережі (CNN)

Згорткові нейромережі показали високу ефективність у розпізнаванні зображень завдяки здатності виявляти локальні ознаки і просторові зв'язки між пікселями. Іслам з колегами розробили модифіковану версію мережі ResNet із додаванням механізмів уваги та перехресних зв'язків, що дозволило досягти точності класифікації понад 96% при розпізнаванні семи поширених захворювань листя томатів. Особливістю цієї моделі стала її стійкість до змін освітлення та складних фонових умов.

4.3.4.2.2. Рекурентні та довгострокові пам'ятні мережі (RNN, LSTM)

Рекурентні нейромережі та їх модифікація — мережі з довготривалою пам'яттю — особливо корисні для обробки часових рядів, таких як динаміка росту або зміна кліматичних умов у теплиці. Наприклад, Чжу та його команда розробили модель прогнозування врожайності томатів, що поєднує історичні дані, метеорологічні параметри (температура, вологість, освітленість) та фізіологічні індикатори (індекс листової поверхні, діаметр стебла). Така модель забезпечила точне прогнозування врожаю на тиждень уперед із середньою похибкою близько 15%.

4.3.4.2.3. Генеративні змагальні мережі (GAN)

Генеративні змагальні мережі використовуються для генерації нових даних або розширення існуючих вибірок. Їх суть полягає в змаганні двох моделей — генератора і дискримінатора — що дозволяє створювати реалістичні синтетичні зразки. Джан з колегами застосували умовну GAN для збагачення

датасету захворювань томатів, де були представлені класи з обмеженою кількістю зображень. Генеровані зразки дозволили значно підвищити точність розпізнавання рідкісних хвороб — загальна точність моделі сягнула понад 97%, що на чверть більше порівняно з базовою версією без використання генерації.

4.3.4.3. Ансамблеві та гібридні моделі

Поєднання різних моделей у єдину систему дозволяє досягти вищої точності та надійності. Такі ансамблеві та гібридні рішення ефективно працюють у системах діагностики томатів.

Наприклад, запропонували модель, що об'єднує CNN та Transformer для комплексного аналізу — одночасного визначення захворювань, оцінки живлення та прогнозування врожайності. CNN відповідає за виділення локальних ознак, а Transformer — за виявлення довготривалих залежностей у даних. На основі вибірки з 5000 зображень модель досягла середньої точності 96% у трьох завданнях, що перевищує ефективність окремих моделей.

4.3.4.4. Перспективи застосування моделей штучного інтелекту в інтелектуальній діагностиці томатів

Моделі штучного інтелекту мають широкий спектр застосування у сфері точного моніторингу та діагностики томатів у тепличних умовах. Від традиційних підходів, таких як метод опорних векторів і випадковий ліс, до сучасних глибинних нейромереж — згорткових (CNN), рекурентних (LSTM), генеративних (GAN), а також гібридних архітектур — кожна з моделей має свої переваги в обробці різних типів задач: аналізу високовимірних даних, розпізнавання зображень, прогнозування за часовими рядами та розширення навчальних вибірок.

Незважаючи на значний прогрес, виклики залишаються. Серед них — потреба у великих обсягах якісних даних, висока обчислювальна складність та стабільність навчання моделей. Проте, завдяки цим підходам значно покращилася ефективність у завданнях діагностики фізіологічного стану рослин, виявлення захворювань, оцінки якості плодів та прогнозування врожайності. Це створює міцне підґрунтя для точного управління процесами вирощування томатів у теплицях.

Сучасні тенденції свідчать про стрімкий розвиток AI-технологій для розумної діагностики. Подальші дослідження мають зосереджуватися на:

- створенні легких та енергоефективних моделей, які можна розгортати на периферійних пристроях;
- використанні методів самонавчання і few-shot learning для зменшення залежності від великих розмічених датасетів;
- підвищенні інтерпретованості моделей для підтримки прийняття рішень;
- інтеграції даних з різних джерел (сенсори, знання, зображення) та застосуванні онтологій і графів знань для побудови комплексних систем діагностики.

4.3.4.5. Якісні відкриті датасети з томатами

Високоякісні набори даних мають критичне значення для ефективного навчання моделей ШІ. Процес підготовки включає збір, розмітку, попередню обробку та розширення даних. Для задач діагностики хвороб томатів важливо сформувати великі вибірки зображень листя та плодів, а їх розмітка має виконуватись фахівцями. Етапи попередньої обробки — нормалізація, зміна розмірів, очищення — забезпечують стандартизацію даних. Техніки аугментації (обертання, віддзеркалення, масштабування, додавання шуму) допомагають збільшити обсяг вибірки та покращити здатність моделей до узагальнення.

Також перспективним є застосування генеративних мереж для створення реалістичних зображень хвороб томатів, що дозволяє збагачувати датасети синтетичними зразками.

Існує низка відкритих наборів даних, які активно використовуються у дослідженнях. Вони відрізняються за кількістю зображень, охопленням видів хвороб, якістю фото та умовами збору. При виборі датасетів варто враховувати їх обсяг, баланс між класами, якість зображень і релевантність до умов реального застосування. Для покращення результатів доцільним може бути комбінування декількох наборів даних та застосування технік аугментації.

4.3.4.6. Методи навчання та валідації моделей ШІ

4.3.4.6.1. Етапи навчання моделей

Навчання моделей є ітераційним процесом, спрямованим на оптимізацію параметрів через мінімізацію функції втрат. Повний цикл побудови системи діагностики за допомогою ШІ передбачає:

- збирання зображень і попередню обробку,
- вибір архітектури моделі,
- налаштування структури та параметрів,
- аугментацію даних,
- розподіл на навчальну й валідаційну вибірки,
- тренування та тестування,
- оцінку якості і точності виявлення ознак.

Цей процес постійно вдосконалюється для досягнення максимальної точності й ефективності.

Для оптимізації моделей використовуються алгоритми, такі як стохастичний градієнтний спуск (SGD), Adam та RMSprop. Вони дозволяють ефективно налаштовувати параметри, зменшуючи помилку прогнозування. Adam і RMSprop є особливо ефективними при роботі зі складними даними, типових для сільського господарства.

4.3.4.6.2. Налаштування гіперпараметрів і запобігання перенавчанню

Правильне налаштування гіперпараметрів — ключ до досягнення оптимальної продуктивності моделі. Для цього використовують методи перебору в сітці (grid search) або випадкового пошуку (random search). Під час тренування слід постійно відстежувати якість на валідаційній вибірці, щоб уникнути перенавчання або недонавчання.

Перенавчання — модель добре працює на навчальних даних, але має погані результати на нових прикладах.

Недонавчання — модель не здатна добре відтворити навіть навчальні дані.

Для запобігання перенавчанню застосовують регуляризацію, коли до функції втрат додають штраф за занадто великі значення параметрів. Ще одним поширеним прийомом є рання зупинка — припинення навчання, коли якість на валідації починає погіршуватися. Метод перехресної перевірки (cross-validation) забезпечує кращу здатність до узагальнення, оскільки модель перевіряється на кількох підвибірках.

4.3.4.5.2. Методи валідації та оцінювання моделей

Валідація моделей є ключовим етапом, що дозволяє оцінити здатність алгоритму до узагальнення на нових, невідомих даних. Основні підходи до валідації включають метод відкладеної вибірки та перехресну перевірку. У першому випадку датасет поділяється на навчальну, валідаційну та тестову вибірки. Остаточне оцінювання ефективності здійснюється саме на тестовій частині. Перехресна перевірка забезпечує більш надійну оцінку за рахунок багаторазового поділу даних і усереднення результатів.

Оцінювання моделей проводиться з використанням спеціальних метрик, які обираються залежно від типу задачі — регресії чи класифікації.

У задачах регресії найчастіше використовуються:

- середньоквадратична помилка (MSE),
- середня абсолютна помилка (MAE),
- коефіцієнт детермінації (R^2), який демонструє, яку частину варіації вихідної змінної пояснює модель.

Для класифікаційних задач застосовуються:

- точність (accuracy),
- точність класифікації позитивного класу (precision),
- повнота (recall),
- F1-міра — гармонічне середнє precision та recall.

Додатково, ROC-крива та площа під нею (AUC) дозволяють оцінити компроміс між чутливістю та хибнопозитивними спрацюваннями на різних порогах. Log Loss вимірює якість передбачених ймовірностей. Для незбалансованих вибірок доцільно застосовувати збалансовану точність, а коефіцієнт каппа враховує випадкову класифікацію, забезпечуючи об'єктивнішу оцінку.

У свою чергу, матриця плутанини візуалізує співвідношення між фактичними та передбаченими класами і дає змогу розраховувати одразу кілька метрик.

Правильний вибір валідаційної вибірки має велике значення. Вона повинна відрізнитися від навчальної і відображати різноманітність вхідних даних за ознаками та умовами збору. Стратифікована вибірка дозволяє досягти балансу класів. У реальних задачах рекомендовано використовувати комбінацію декількох метрик для повноцінної оцінки та подальшого вдосконалення моделей.

Системи, засновані на штучному інтелекті, відкривають нові горизонти моніторингу в тепличному вирощуванні томатів, об'єднуючи дані з різних джерел та аналітичні алгоритми в єдине діагностичне середовище.

4.3.5. Сучасні виклики та напрями подальшого розвитку

Швидкий розвиток тепличної галузі та поява нових технологій сприяли активному впровадженню мультисенсорних систем і штучного інтелекту в управлінні виробництвом. Це означає початок нової ери точного та інтелектуального агроменеджменту. Проте залишаються технічні та прикладні обмеження, які потребують уваги. Далі розглядаються перспективи розвитку мультисенсорної діагностики й AI-технологій у виробництві тепличних томатів, а також можливі інноваційні рішення актуальних проблем.

4.3.5.1. Перспективи мультисенсорної інтеграції та AI-діагностики

4.3.5.1.1. Потенціал для підвищення якості та ефективності

Поєднання глибинного навчання та мультисенсорних технологій дозволяє суттєво покращити діагностику захворювань і управління живленням. Показано, що інтеграція даних з різних джерел покращує точність діагностики щонайменше на 10% у порівнянні з окремими спектральними або флуоресцентними методами. AI-системи точного поливу та живлення забезпечують економію води на понад 4% та збільшення врожаю на 26% у порівнянні з традиційними методами.

Очікується, що до 2030 року завдяки розвитку сенсорів, 5G-зв'язку та edge-computing понад половина тепличних господарств перейдуть на ці технології, що дозволить зменшити споживання води на 50% і підвищити ефективність використання добрив на 30–50%.

4.3.5.1.2. Усунення обмежень сенсорики для оптимізації всієї системи

На сьогодні основна увага зосереджена на надземних частинах рослин, у той час як моніторинг ґрунту, кореневої системи та патогенних мікроорганізмів ще недостатній. Майбутні дослідження повинні спрямовуватись на створення нових сенсорів для контролю підземної частини рослин та об'єднання інформації з різних рівнів і джерел в єдину інтелектуальну систему управління — від селекції до логістики.

Наприклад, точність деяких моделей, яка в лабораторних умовах сягала 95%, знижувалася до 90% при зміні освітлення чи вологості. Впровадження механізмів уваги в згортковій мережі дозволяє адаптивно виділяти ознаки та підвищити точність діагностики майже на 9%. Нові методи асоціативного відстеження об'єктів дозволяють обробляти складні просторово-часові дані.

Крім того, сучасні AI-моделі забезпечують точний прогноз мікроклімату. Наприклад, глибинні нейромережі можуть передбачити температуру повітря з похибкою менше 0,8 °C. Це відкриває шлях до предиктивного управління з використанням систем підкріплення — наприклад, утримання температури 25 °C

при мінімальних витратах енергії завдяки динамічному керуванню обігрівом, вентиляцією та дозуванням CO₂.

4.3.5.2. Виклики та можливості в галузі біосенсорики та «зеленого» Інтернету речей

4.3.5.2.1. Екологічна стійкість: інновації у «зелених» сенсорах

Традиційні неорганічні сенсори (на основі кремнію або металевих оксидів) мають низку екологічних недоліків: обмежена довговічність, низька біорозкладність, ризик забруднення. Щороку мільйони старих сенсорів з обладнання для захисту рослин вивільняють важкі метали в ґрунт.

Рішенням є розробка біосумісних, чутливих і енергоефективних сенсорів з природних полімерів, таких як целюлоза або хітозан. Такі сенсори демонструють гарні механічні та електричні властивості, а також здатність до біодеградації. Проте для широкого впровадження необхідно покращити їх стабільність, довговічність та здешевити виробництво. Це потребує подальших досліджень у галузях матеріалознавства та гнучкої електроніки.

4.3.5.3.3. Взаємодія зі виробниками та підтримка на рівні політик

До пріоритетних стратегій, які можна впроваджувати вже сьогодні, належать практичні рішення для подолання наявних бар'єрів у впровадженні цифрових технологій у тепличному господарстві. Ефективне застосування систем мультисенсорної інтеграції та діагностики на основі штучного інтелекту потребує скоординованої співпраці між розробниками, операторами теплиць та регуляторними структурами.

Незважаючи на доведені переваги таких систем у запобіганні хворобам рослин і підвищенні ефективності використання ресурсів, рівень їх впровадження у комерційних теплицях залишається обмеженим. Водночас політика, орієнтована на стандартизацію технологій і спрощення обміну даними, має суттєвий вплив на підвищення сумісності рішень і покращення якості діагностичних моделей.

Особливої уваги заслуговують інтерактивні системи штучного інтелекту, які враховують зворотний зв'язок від операторів. Завдяки залученню людини до процесу навчання системи досягається вища точність виявлення стресів рослин. Важливим чинником успіху є також розробка інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, адаптованих для користувачів без спеціальної технічної підготовки.

Отже, впровадження мультисенсорного моніторингу та технологій штучного інтелекту у тепличне виробництво томатів потребує одночасного вирішення технічних та управлінських завдань. Йдеться про створення надійної сенсорної інфраструктури, забезпечення безпеки даних при збереженні їхньої практичної цінності, а також формування сприятливого середовища для адаптації інновацій. У перспективі слід орієнтуватися на створення доступних, прозорих і технічно досконалих систем діагностики для високоточного моніторингу фізіологічного стану та умов навколишнього середовища.

4.3.6 Висновки

У даному огляді системно проаналізовано дослідження, присвячені мультисенсорній інтеграції та застосуванню штучного інтелекту для діагностики фізіологічних та екологічних параметрів у тепличному виробництві томатів у режимі реального часу. Представлено детальний аналіз сучасних і перспективних тенденцій розвитку інтелектуальних аграрних технологій. В умовах глобальних кліматичних змін та викликів продовольчої безпеки підвищення ефективності й сталості агровиробництва стає ключовою метою інновацій у сільському господарстві. Як один із показових прикладів сучасного агровиробництва, інтелектуальне та прецизійне управління тепличним вирощуванням томатів має вирішальне значення для забезпечення продовольчої безпеки та сталого розвитку аграрного сектору.

Основні висновки огляду:

- Мультисенсорна інтеграція у поєднанні з алгоритмами глибокого навчання суттєво підвищує точність та оперативність діагностики фізіологічного стану рослин і параметрів навколишнього середовища. Моделі діагностики захворювань на основі мультимодальних даних досягають точності понад 95%, що перевищує на понад 10% результати моделей на основі одного сенсора, забезпечуючи ефективне управління фітосанітарним станом.
- Технології високопродуктивного, неінвазивного моніторингу є надійним інструментом для контролю стану томатів у реальному часі. Наприклад, зображення хлорофільної флуоресценції дає змогу виявити бактеріальне в'янення за 1–2 дні до появи візуальних симптомів. Поєднання інфрачервоних датчиків CO₂ з інноваційними агросистемами здатне підвищити врожайність томатів на 28–43%. Крім того, використання мультиспектральної зйомки у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволяє досягати точності діагностики понад 90%.
- Інтеграція Інтернету речей (IoT) з бездротовими сенсорними мережами (WSN) забезпечує високоточне управління тепличним виробництвом. Застосування протоколів зв'язку, таких як ZigBee, LoRa та NB-IoT, сприяє моніторингу та автоматичному регулюванню параметрів мікроклімату в режимі реального часу, що дозволяє значно підвищити ефективність використання води та добрив і, в окремих випадках, збільшити врожайність на 50%.
- Залучення знань фермерів у процес прийняття рішень на основі штучного інтелекту за допомогою механізмів інтеракції людини з машиною є критично важливим для підвищення довіри, пояснюваності та сприйняття інтелектуальних діагностичних систем. Інтерпретовані моделі ШІ, що узгоджуються з досвідом фермерів, сприяють активнішому впровадженню технологій у практику.
- Масштабне впровадження мультисенсорних та ШІ-рішень у тепличному виробництві потребує підтримки з боку політики та скоординованих дій усіх зацікавлених сторін. Встановлення стандартів для сенсорів підвищує сумісність різних систем і ефективність використання даних, а розвиток

платформ для обміну інформацією покращує якість діагностичних моделей. Рекомендовано впроваджувати фінансові стимули, підтримувати демонстраційні проекти та заохочувати спільні дослідження для розкриття потенціалу технологій у забезпеченні сталого розвитку тепличного господарства.

Хоча основна увага в огляді приділялася вирощуванню томатів, розглянуті сенсорні технології, інструменти штучного інтелекту та методи управління є універсальними та можуть бути адаптовані до широкого спектра культур у тепличному садівництві.

Отримані наукові результати формують теоретичну базу й технічну підтримку для впровадження інтелектуального та прецизійного управління у тепличному виробництві томатів. Це сприяє інноваційному розвитку сучасного садівництва, підвищує ефективність агровиробництва, сприяє збереженню ресурсів та охороні довкілля, пропонуючи реальні рішення для подолання глобальних викликів — зміни клімату та забезпечення продовольчої безпеки.

4.4 ОСТАННІ ДОСЯГНЕННЯ У СФЕРІ НОСИМИХ ТА ІМПЛАНТОВАНИХ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ (БІО)СЕНСОРІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я РОСЛИН

4.4.1 Вступ. Носимі та імплантовані сенсори стають дедалі популярнішими у біомедичних застосуваннях завдяки своїй портативності та здатності здійснювати неінвазивний аналіз у реальному часі безпосередньо на місці. Постійний розвиток Інтернету речей (IoT) розширив використання носимих сенсорів не лише в медицині, але й за її межами. Сьогодні з'явилася нова концепція — Інтернет рослин (IoP). Йдеться про оснащення рослин сенсорами, здатними збирати й передавати дані про їхні хімічні, фізичні, фізіологічні та екологічні потреби.

Актуальність носимих сенсорів для рослин нещодавно була підкреслена Всесвітнім економічним форумом, який у 2023 році включив їх до ТОП-10 перспективних технологій. Це визнання зумовлене потенціалом таких «розумних» пристроїв революціонізувати виробництво та управління сільськогосподарськими культурами.

В епоху точного землеробства носимі та імплантовані сенсори відіграють ключову роль у підвищенні ефективності агровиробництва. Зокрема, носимими вважаються сенсори, що закріплюються на рослинах — наприклад, на листках або стеблах, а імплантованими — ті, що вводяться безпосередньо в стебло чи всередину плоду. Моніторинг ключових аналітів *in situ*, визначення молекул у судинній системі рослини (ксилема/флоема) та виявлення летких сполук, які виділяються через продихи, за допомогою «розумних» сенсорів забезпечують цілісність зразків та високу достовірність результатів, перевершуючи традиційні методи відбору проб.

Крім того, носимі та імплантовані сенсори є неструктурними або мінімально інвазивними та підходять для застосування на різних частинах рослин, де забезпечується щільний контакт між сенсором і рослиною. Такий підхід дозволяє більш точно досліджувати фізіологічний метаболізм рослин і реакції на біотичні та абіотичні стресові фактори, що має велике значення для майбутніх агропрактик.

Наукова спільнота проявляє все більший інтерес до аналітичних інструментів для рослин, що сприяло появі великої кількості оглядових публікацій. Вони охоплюють як лабораторні методи, так і важливість нанобіотехнологій у створенні «розумних» сенсорів для рослин, а також різноманітні оптичні, п'єзорезистивні, ємнісні та електрохімічні сенсори.

Більшість попередніх оглядів фокусуються на типах аналітичних методів, лише поверхово торкаючись носимих та імплантованих сенсорів для рослин. Крім того, у деяких з них, що описують електрохімічні (біо)сенсори, не охоплюється широкий спектр рослинних біомаркерів та контамінантів і розглядаються переважно класичні сенсори та лабораторні методи.

Цей огляд відрізняється від попередніх двома ключовими аспектами:

- Він зосереджений виключно на електрохімічному аналізі, детально розглядаючи як носимі, так і імплантовані конфігурації для *in vivo* моніторингу стану здоров'я рослин. Традиційні методи та (біо)сенсори для *ex-situ* аналізу молекул тут не розглядаються.
- Уперше представлено повний спектр молекул та пов'язаних сигналів, які до цього часу відстежувалися за допомогою носимих та імплантованих електрохімічних (біо)сенсорів. Серед них: біомаркери стресу, біомаркери росту, сигнальні молекули, агрохімікати, леткі сполуки та інші метаболіти рослин.

У межах огляду проведено чітке розмежування між носимими та імплантованими електрохімічними (біо)сенсорами, що були розроблені до сьогодні для моніторингу рослинних молекул. Описано конструкції, принципи дії, аналітичні характеристики, а також використання сталих матеріалів, біорецепторів і наноматеріалів у їх створенні. Окрему увагу приділено перевагам і недолікам різних конфігурацій.

Крім того, розглянуто застосування таких сенсорів у точному землеробстві, підкреслено високий потенціал цієї технології, а також існуючі недоліки, що потребують суттєвого вдосконалення.

4.1.2. Носимі та імплантовані електрохімічні (біо)сенсори для моніторингу стану рослин

4.1.2.1. Агрохімікати

4.1.2.1.1. Носимі (біо)сенсори

Нещодавно носимі сенсори для рослин широко застосовуються для виявлення пестицидів. Наприклад, електрохімічні сенсори були розроблені для виявлення карбендазиму — широкоспектрового карбаматного фунгіциду з мутагенними і репротоксичними властивостями. Для контролю неправильного

використання цього пестициду створено сенсори на основі крафт- і пергаментного паперу, які в реальному часі відстежують присутність карбендазиму на шкірці яблук і капусти. Як показано на **Рис. 4.4.1А**, повна електрохімічна комірка з контр-, робочим і опорним електродами була виготовлена на паперових субстратах за допомогою трафаретного друку і розміщена на поверхні фруктів та овочів. Визначення карбендазиму здійснювалося підключенням сенсора до потенціостату через адаптований конектор. Морфологічний та електрохімічний аналіз показав, що крафт-папір має великий потенціал для визначення карбендазиму завдяки пористій структурі, що забезпечує велику площу електрода і формування численних карбоксильних груп на поверхні після активації. Для імітації реальних умов 100 μM розчин карбендазиму розпилювали на яблуках і капусті, сушили при кімнатній температурі і розчиняли на поверхні зразків за допомогою фосфатного буфера. Концентрації карбендазиму на поверхні становили 0,7 μM для яблук та від 0,3 до 1,1 μM для капусти, що визначали методом диференційованої імпульсної вольтамперометрії (ДІВ) при потенціалі +0,57 В. Сенсор показав специфічність навіть у присутності інших агрохімікатів, а також гарну механічну стабільність — лише 8 % зниження сигналу після 100 циклів.

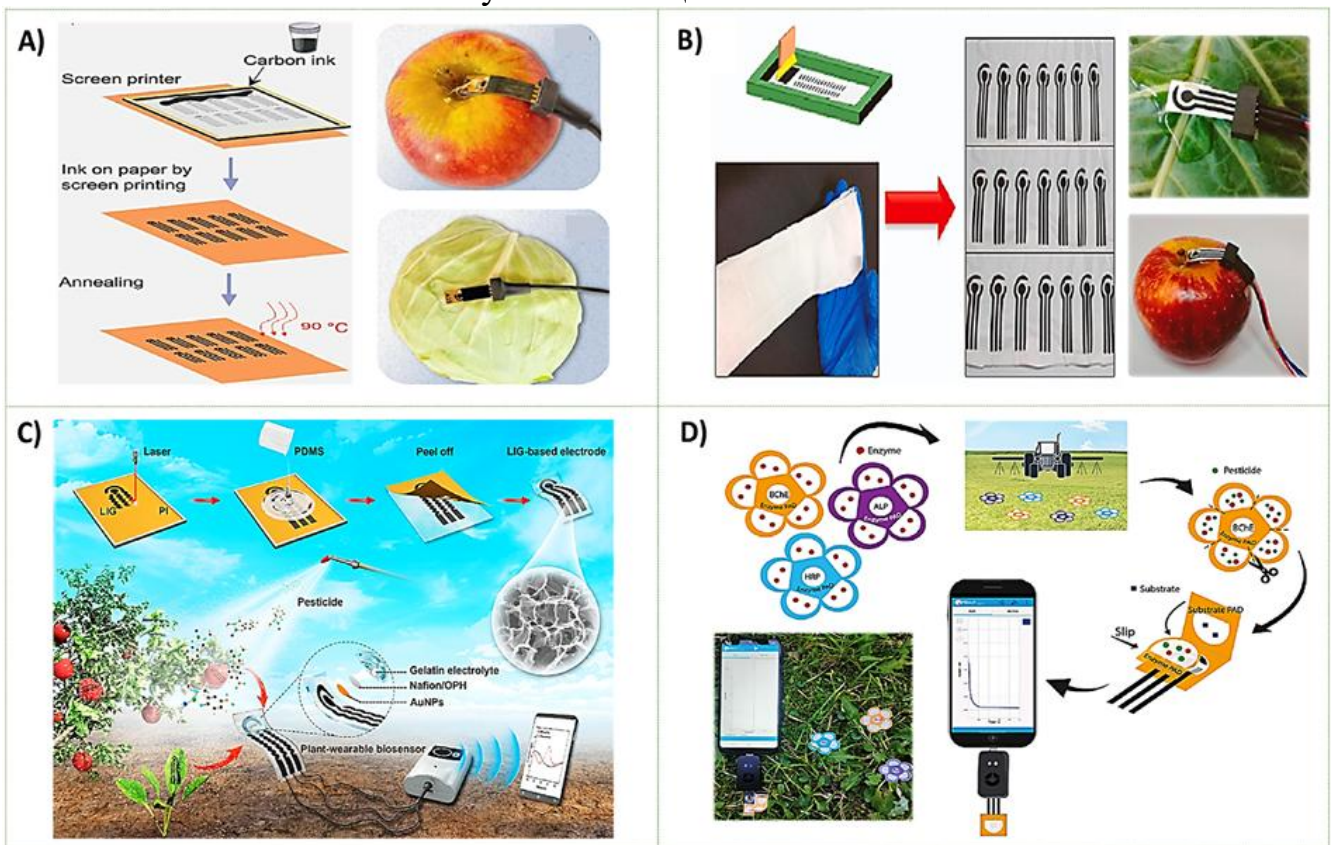


Рис. 4.4.1. Носимі електрохімічні (біо)сенсори

Для створення більш екологічного, біосумісного і гнучкого сенсора, здатного адаптуватися до нерівних і вигнутих поверхонь рослин, виготовили матриці з полі(молочної кислоти) (PLA) методом розпилювального прядіння, на які нанесено повний електрохімічний сенсор (**Рис. 4.4.1В**). Завдяки гнучкості PLA сенсори прикріплювали до шкірки яблук і капусти для окремого визначення

карбендазиму та дікуату, контролюючи їх окислення при +0,57 В і -0,7 В відповідно за допомогою ДІВ і квадратурної вольтамперометрії (КВ). Перед аналізом поверхні рослин обробляли 100 μM розчинами пестицидів, що дозволяло визначати від 1,1 до 0,38 μM карбендазиму та від 0,32 до 0,97 μM дікуату на яблуках і капусті відповідно. Відтворюваність сенсорів оцінювали за допомогою відносного стандартного відхилення (RSD), що становило 9,5 %.

Ще одним біосумісним матеріалом є целюлозний ацетат, що використовується для виготовлення гнучких, повністю друкованих неензимних електрохімічних сенсорів. Сенсор прикріплювали до листя салату і томатів за допомогою стрічки для виявлення карбендазиму і параквату. Поверхню обробляли 1000 μM розчином відповідного пестициду, після чого визначали окислювальні піки при +0,55 В і -0,87 В методами ДІВ і КВ. Сенсори проявили селективність, показавши незначний вплив інтерферентів, а також зберегли стабільність сигналу після згинання підкладки, підтверджуючи придатність для використання на різних поверхнях рослин.

Окрім прямого окислення пестицидів, їх концентрацію можна визначати за допомогою носимих ферментних біосенсорів. Наприклад, фермент ортаннофосфорної гідролази і золотоносні наночастинки використовувалися для модифікації робочого електрода 3D-пористого графену, виготовленого на полііміді методом лазерного письма. Для підвищення гнучкості конструкцію перенесли на силіконовий полімер PDMS (Рис. 4.4.1С). Біосенсор із желатиновим напівтвердим електролітом, розміщений на листі шпинату та яблуку, моніторив гідроліз 100 μM метилпаратиону, що спричиняв утворення п-нітрофенолу, за потенціалом близько -0,10 В методом КВ.

Проте сигнал біосенсорів на листі шпинату і яблуці був значно слабшим, ніж на зразках поліетилентерефталату, що пов'язано з нерівною поверхнею рослинної продукції. Використання термостабільного ферменту підвищує зберігання біосенсорів, що важливо для польових застосувань. Такі біосенсори можуть ефективно контролювати залишки пестицидів, сприяючи точному землеробству і харчовій безпеці.

Лазерне пряме письмо також застосували для створення мікрофлюїдного біосенсора з графеновими золотими електродами і гідрофільними PDMS-каналами для розміщення на листках рослин і виявлення метилпаратиону. Канали оснащені портами для капілярного поглинання електроліту, що направляє інсектицид до електрода, де він гідролізується під дією ліпази з утворенням п-нітрофенолу. Біосенсор показав межу виявлення 0,000646 μM у діапазоні 0,001–2 μM . Аналіз проводили на листках *Erigeron aureum* і салату, які обробляли інсектицидом і фосфатним буфером, отримуючи відновлення від 94,3 до 99,8 %. Незважаючи на неінвазивність і добру аналітичну продуктивність, після кожного тесту потрібно очищати мікроканали, а при високих концентраціях (2–200 μM) відзначали зниження чутливості через накопичення побічних продуктів на електроді.

Окрім носимих ферментативних біосенсорів, застосованих для овочів і фруктів, був розроблений носимий біосенсор для контролю використання

пестицидів у сільському господарстві, який вимірює концентрацію пестицидів у ґрунті. Ідея полягала у створенні паперових біосенсорів у формі квітки для розміщення на поверхні трави з метою аналізу надмірного використання пестицидів, які потрапляють у ґрунт у вигляді аерозолі та можуть забруднювати його і підземні води. Надійність цього пристрою була підтверджена вимірюванням пестицидів параоксону, 2,4-дихлорфеноксоцтової кислоти та гліфосату, які інгібують активність відповідно бутирилхоліністерази, лужної фосфатази та пероксидази. В якості біосумісної та недорогої основи використовувався офісний папір, на якому друкувався повний електрохімічний біосенсор. Паперовий «квітковий» модуль з п'ятьма пелюстками, кожна з яких містила окремий фермент, розміщувався на траві перед обприскуванням пестицидами (рис. 4.4.1D). Пористість паперу у такій конструкції дозволяла збирати пестициди в аерозольній фазі без додаткової системи відбору проб. Для кількісного визначення пестицидів кожен паперовий електрод у форматі оригамі поєднувався з ферментним та субстратним модулями для моніторингу активності ферментів після впливу відповідного пестициду. Біосенсор підключався до портативного потенціостата, керованого зі смартфона, а визначення концентрації пестицидів починалося з введення ферментного модуля у паперовий пристрій. За допомогою хронопотенціометричних вимірювань було зафіксовано чутливість до 30, 10 та 2 частин на мільярд для 2,4-дихлорфеноксоцтової кислоти, гліфосату та параоксону відповідно.

4.4.2.2. Фітогормони

4.4.2.2.1. Носимі (біо)сенсори

Фітогормони — це вторинні метаболіти, які рослини виробляють для регуляції росту, репродуктивних процесів, тривалості життя та старіння. Саліцилова кислота відома як сигнальна молекула, що активує імунітет рослини проти різноманітних біотичних та абіотичних стресів. Було розроблено носимий електрохімічний сенсор на основі вугільної стрічки, покритої багат шаровими вуглецевими нанотрубками (MWCNTs) і Nafion, для *in vivo* вимірювання саліцилової кислоти. Робочий шар був закріплений на провідній поверхні із скла з індій-олівцевим оксидом (ITO) та використовувався у вигляді сендвіча з листком томату і фільтрувальним папером Whatman, який зберігав буферний розчин і забезпечував провідний контакт із трьохелектродною системою (рис. 4.4.2A).

Для безперервного моніторингу саліцилової кислоти без впливу на ріст томата в листі було зроблено невеликий отвір ($\varnothing = 1,5$ мм), через який кислота дифундувала на електрод, де відбувалася її окиснювальна реакція при потенціалі +0,7 В відносно Ag/AgCl. Вимірювання в буферних розчинах показали межу виявлення менше 0,05 мкМ із відносним стандартним відхиленням (RSD) 17 %. Референсний і контрелектроди можна було багаторазово використовувати, що знижувало вартість сенсора. Практичне застосування сенсора було перевірено на здорових, генетично модифікованих (без активності PDS-гена) та уражених

листках томатів, де відмічалось значне підвищення концентрації саліцилової кислоти у хворих рослин і за біотичних стресів.

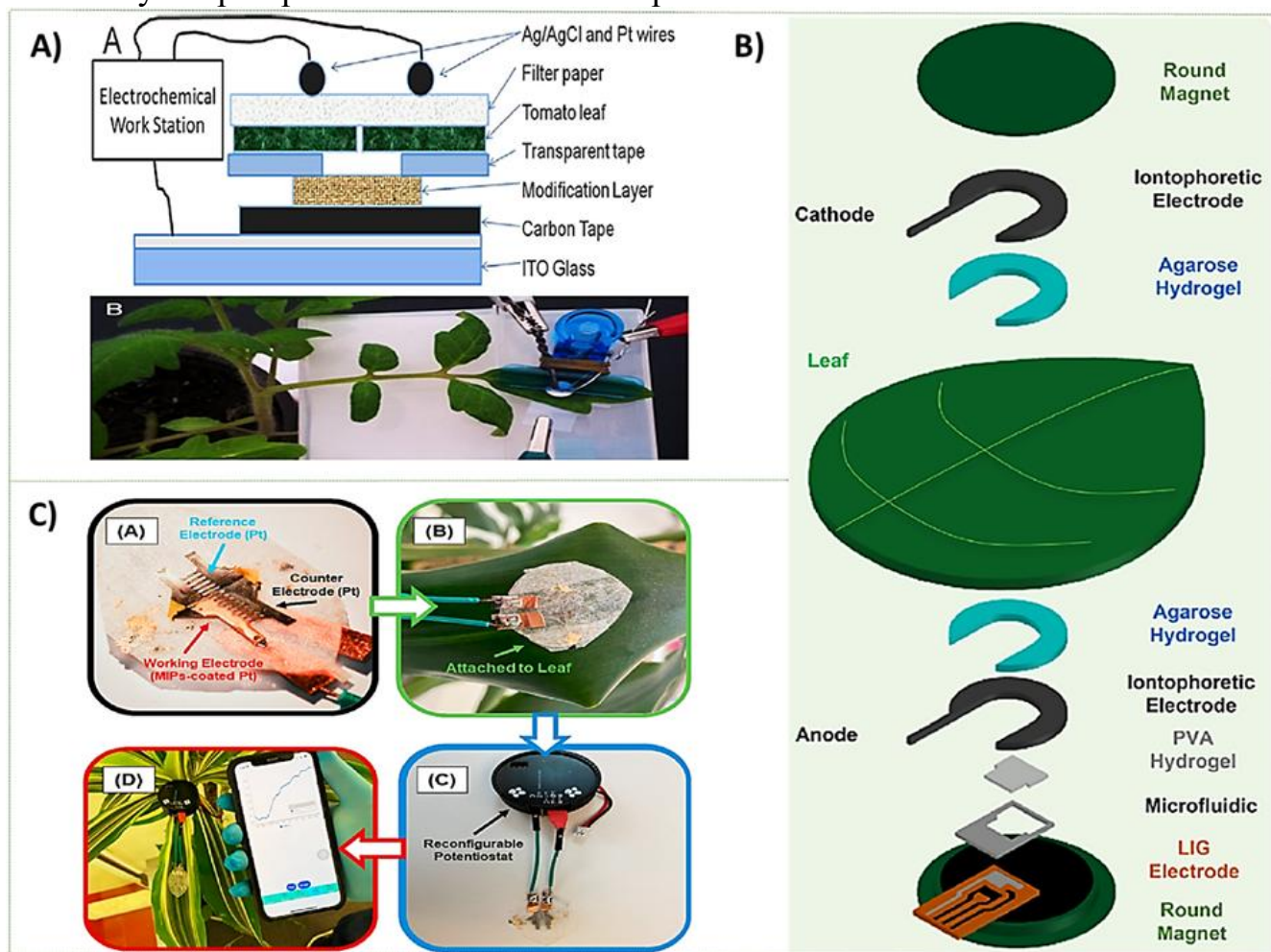


Рис. 4.4.2. Конструкції біосенсорів: А) Носимий електрохімічний сенсор із вугільної стрічки та фільтрувального паперу для *in vivo* визначення саліцилової кислоти в листках томату, В) Носимий безінвазивний сенсор з лазерно індукованого графену для моніторингу саліцилової кислоти в реальному часі, С) Носимий біосенсор на основі мікроголок у поєднанні з молекулярно відбитковим полімером для моніторингу грибкових інфекцій у тютюні.

Інша сендвіч-конфігурація для моніторингу саліцилової кислоти була створена із застосуванням зворотної іонтофорезної системи, яка безінвазивно витягує рідкі зразки з листя, у поєднанні з електродами з лазерно індукованого графену (LIG) (рис. 4.4.2В). Сенсор кріпився до листка за допомогою двох магнітів, які виконували роль анода і катода. Анод утримував LIG-електроди для окиснення аналізату, срібний електрод для подачі іонтофорезного струму, агарозний гідрогель для електричного контакту з листям і полі(вініловий спирт) гідрогель для дифузії аналізату. Катодний магніт також був оснащений відповідним електродом і гідрогелем.

In vitro дослідження сенсора у стандартних розчинах саліцилової кислоти показали межу виявлення 8,2 мкМ у лінійному діапазоні 10–1000 мкМ при хронопотенціометричних вимірюваннях при потенціалі +0,8 В. Виявлено

мінімальні перешкоди з боку метаболітів, таких як сахароза, фруктоза, оксалатна і лимонна кислоти.

In vivo застосування системи було оцінено на рослинах авокадо, які піддавалися посуші та соляному стресу протягом 10 днів. Сенсор розміщувався на листі, його реакція стабілізувалася шляхом 20 хронопотенціометричних зчитувань. Екстракція саліцилової кислоти відбувалася при струмі 0,53 мА протягом 10 хв у режимі хронопотенціометрії. Потім проводився електрохімічний аналіз при сталому потенціалі окиснення 0,8 В протягом 30 с із інтервалом вибірки 0,2 с і часом стабілізації 1 с.

In vivo дослідження показали, що накопичення ендогенної саліцилової кислоти було більш вираженим за посухи, що підтверджує важливість води для росту рослин і швидкий вплив її дефіциту на авокадо в порівнянні із соляним стресом, який є зазвичай тривалим фактором.

Інший дизайн передбачає виготовлення електрохімічного сенсора з масивом мікроелектродів типу interdigitated (IDME) на кварцовій підкладці, де три групи IDME працюють як трьохелектродна система для in vivo моніторингу саліцилової кислоти у огірках. Зона сенсора включає понад 2000 мікроелектродів шириною по 1 мкм кожен, що покращує масообмін за рахунок радіального дифузійного процесу. Для підвищення електрокаталітичної активності сенсора на мікроелектроди щільно нанесено наночастинки ядро-оболонка Au@Cu₂O-графен-полідопамін, що дозволяє окислення саліцилової кислоти при +0.3 В. Перед практичним застосуванням на сенсор було нанесено 6 мкл розчину саліцилової кислоти різної концентрації, що дало межу виявлення 1.16 нМ у діапазоні 0.01–100 мкМ та відносне стандартне відхилення 4.89 % за шістьма сенсорами.

Селективність сенсора до саліцилової кислоти оцінювали за змінами пікового струму у присутності різних речовин, зокрема індол-3-оцтової кислоти — іншого фітогормону. Було виявлено значне втручання: флуктуація пікового струму саліцилової кислоти становила 12.6 % при присутності індол-3-оцтової кислоти, у порівнянні з 5 % зміною у присутності інших інтерферентів, що підкреслює можливість впливу індол-3-оцтової кислоти на визначення саліцилової кислоти.

Для моніторингу рівня саліцилової кислоти в процесі росту рослин сенсор встановили на живих стеблах та листках огірка. Спостерігалось поступове збільшення концентрації саліцилової кислоти: від 10.263 до 16.052 мкМ у стеблах та від 0.107 до 0.688 мкМ у листках, що свідчить про зміни рівня цього фітогормону протягом росту огірка. Хоча сенсор має великий потенціал для застосування в режимі реального часу, його конструкція на кварцовій підкладці та плоска форма можуть бути непридатними для моніторингу на вигнутих і нерівних поверхнях.

Для вирішення проблеми інтерференції селективний магнітний молекулярно відбитковий полімер (MIP) поєднали з мікроголковими електродами для in vivo застосування (рис. 4.4.2С). Пристрій містить гребінки інтердигітальних електродів, декорованих конічними мікроголками. Після

проникнення мікроголок крізь кутикулу та встановлення контакту з мезофілом листка, МІР вибірково зв'язує саліцилову кислоту в апопласті, що дозволяє її окислення за допомогою хронопотенціометричних вимірювань з використанням портативного легкого потенціостата, уникнувши явищ тігмоморфогенезу у рослині.

В *in vitro* дослідженнях біосенсор показав межу виявлення 2.74 мкМ у діапазоні до 150 мкМ. Селективність підтверджена відсутністю електрохімічних піків для інших фітогормонів, включно з індол-3-оцтовою кислотою при концентрації 100 мкМ. Це свідчить, що застосування біосенсора *in vivo* навряд чи буде обмежене варіаціями рівня інших фітогормонів.

Для оцінки реакції біосенсора на патогенні інфекції його прикріпили до здорових і заражених *Botrytis cinerea* листків тютюну однакового віку. Було виявлено, що базовий рівень саліцилової кислоти у заражених листках зріс через 5 хвилин після інокуляції, до появи видимих спорових уражень. Це свідчить про те, що розроблений біосенсор може бути придатним для раннього виявлення грибкових патогенів ще до появи видимих симптомів.

Міцність мікроголок і надійний зв'язок між магнітними електродами та полімером дозволяють повторне використання біосенсора у польових умовах, особливо в поєднанні з портативним програмованим потенціостатом. Крім того, застосування МІР можна розширити на інші рослинні біомаркери шляхом виготовлення магнітних МІР з різними шаблонами.

4.4.2.2. Імплантовані датчики

Враховуючи ключову роль фітогормонів у регуляції росту рослин та складнощі з надійністю носимих сенсорів в умовах змінних факторів навколишнього середовища, дослідники звернули увагу на імплантовані сенсори, які безпосередньо вводяться в тканини рослин для *in vivo* виявлення фітогормонів.

Для цього використовували мікроголки для створення масиву сенсорів на основі Au@SnO₂-вертикального графену (VG), вирощеного на танталових мікроелектродах методом хімічного осадження парів за допомогою дугової плазмової реакції. Хоча виготовлення Au@SnO₂-VG мікроелектродів є складним, вони мають низький рівень інвазії та високу здатність проникати у судинну систему рослин, що дозволяє проводити *in vivo* моніторинг абсцизової кислоти у плодах огірка (рис. 4.4.3А). Електрохімічна система, що складається з трьох Au@SnO₂-VG мікроелектродів, платиного дроту та титанового дроту (робочий, контр- та опорний електроди відповідно), демонструє високу стабільність зберігання протягом щонайменше 6 тижнів. VG плівка забезпечує високу провідність та несе наночастинки Au@SnO₂, які відповідають за пряме окислення абсцизової кислоти при +1.25 В. При введенні сенсора у плід огірка концентрації абсцизової кислоти варіювали від 0.087 до 95.17 μМ, тоді як у соку огірка — від 71.72 до 90.91 μМ. Значна варіація пояснюється тим, що сенсор вимірює гормон локально, а не усереднене значення по плоду. Такий сенсор

може бути не підходящим для рослин з жорсткою структурою, що ускладнює імплантацію.

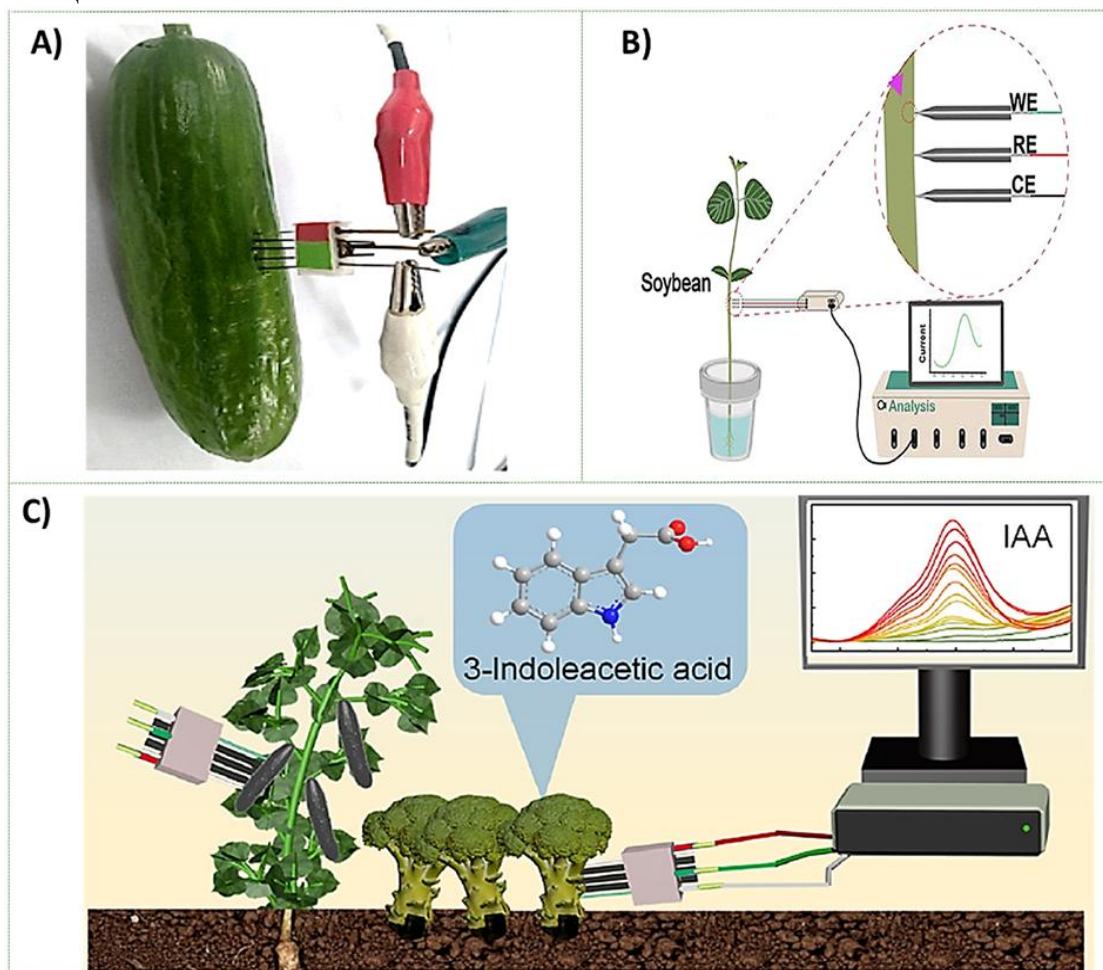


Рис. 4.4.3 А) Імпантований мікроголковий сенсор для *in vivo* моніторингу абсцизової кислоти у плодах огірка, В) Мікросенсор на основі ановізованого нержавіючого сталевого дроту для *in vivo* визначення індол-3-оцтової кислоти в стеблах сої під соляним стресом, С) Імпантований мікроголковий масив сенсорів для визначення індол-3-оцтової кислоти в овочах (огірок і цвітна капуста).

Імпантовані сенсори також створювали на основі нержавіючих сталевих дротів, які характеризуються гарною електропровідністю, високою механічною міцністю і стабільністю. Ановізований сталевий мікроелектрод було покрито наноструктурами Au у вигляді попкорну, платиновими наночастинками, композитом із відновленого графен оксиду та фільмом сафраніна Т для виявлення індол-3-оцтової кислоти в стеблах сої при соляному стресі (рис. 4.4.3В). Моніторинг окислювального піку при +0.7 В за допомогою диференційної пульс-вольтаметрії (DPV) показав хорошу селективність та стабільність протягом 3 тижнів, з межею виявлення 43 пг/мл. В *in vivo* аналізі при соляному стресі концентрація індол-3-оцтової кислоти у стеблах сої підвищувалась до 157.44 ± 23.03 нг/мл через 12 годин і знижувалась до 10.55 ± 2.84 нг/мл через 24 години, що свідчить про можливість використання сенсора

для моніторингу впливу абіотичного стресу на ріст рослин. Важливо уникати контакту сенсора з тканиною для збереження цілісності і сенсора, і рослини.

Інше повідомлення стосується імплантованого масиву мікроголкових сенсорів, які складаються з трьох робочих електродів із вертикального/горизонтального графену, платинових та титанових дротів (контр- і опорний електроди), виготовлених за допомогою електронно-активованого гарячої нитки хімічного осадження парів (рис. 4.4.3С). Поєднання шарів графену збільшує контактну площу з електролітом, покращує адсорбцію/десорбцію аналізованої речовини та її електрохімічне окислення. Сенсор демонструє кращу чутливість при використанні трьох робочих електродів у порівнянні з одним або двома. Межі виявлення коливаються від 0.21 до 0.71 μM залежно від кількості електродів. Селективність перевіряли у присутності 20 інтерферентів, що викликало зміну пікового струму від 0.27 % до 9.45 %. Аналіз зразків овочів виконували, вводячи сенсор у стебло огірка та точку з'єднання кореня і стебла цвітної капусти. Концентрації індол-3-оцтової кислоти значно варіювали: 2.0–11.4 μM в огірках і 1.7–4.8 μM у цвітній капусті. Незважаючи на плоску морфологію електродів, що дозволяє їх приєднувати до листя або вводити у тканини, необхідні подальші дослідження для підвищення точності через наявність помилки у реальних застосуваннях.

4.4.2.3. Прекурсори росту

4.4.2.3.1. Імплантовані (біо)сенсори

Біосинтез фітогормонів, згаданих вище, зазвичай контролюється молекулами-попередниками росту, такими як триптофан — незамінна амінокислота, що бере участь у синтезі фітогормону індол-3-оцтової кислоти. Крім того, триптофан може ковалентно зв'язуватися з абсцизовою кислотою, яка відповідає за пригнічення поділу клітин у рослинах під впливом абіотичного стресу, що, у свою чергу, сприяє росту рослин. Першу спробу *in vivo* моніторингу триптофану в рослинах було здійснено шляхом використання стандартного скляного вуглецевого електрода (GCE) (розміри: 10 × 20 × 1 мм), який був безпосередньо вставлений у плід томату. Робочий електрод було модифіковано полідофаміном і наночастинками MnO_2 на основі відновленого графену для забезпечення електрохімічного окиснення триптофану при +0,7 В з використанням диференціального імпульсного вольтамперометричного методу (DPV).

Під час *in vitro* досліджень сенсора в межах рН 4,0–7,0 було встановлено лінійний діапазон виявлення триптофану від 1 до 300 μM , а межі виявлення становили 0,22–0,39 μM . Сенсор також продемонстрував відмінну вибірковість щодо різних циркулюючих молекул (індол-3-оцтова кислота, абсцизова кислота, саліцилова кислота, глюкоза, L-аланін, L-серин, мальтоза та сахароза). Щодо *in vivo* виявлення триптофану в плодах томату, сигнал окиснення був зафіксований з 18-го по 32-й вольтамперограму, після чого піковий струм значно зменшився, що пов'язано з десорбцією триптофану з поверхні електрода. Хоча застосування скляного вуглецевого електрода забезпечило високу електрокаталітичну

активність і вибірковість щодо окиснення триптофану, його великі розміри ($10 \times 20 \times 1$ мм) спричиняли пошкодження тканин рослини при введенні електрода, що робить цей сенсор непридатним для *in vivo* моніторингу триптофану в дрібних рослинах або малих тканинах.

У зв'язку з великими розмірами GCE, які можуть спричиняти пошкодження рослин і перешкоджати їхньому росту, була розроблена мініатюризована сенсорна система на основі графітового електрода (GRE), модифікованого багат шаровими вуглецевими нанотрубками (MWCNTs) та плівкою полі(сульфосаліцилової кислоти). Під час *in vitro* аналізу сенсор демонстрував лінійний діапазон 10–110 мкМ і межу виявлення від 0,037 до 0,121 мкМ залежно від рН (4,0–4,8) розчину триптофану. Як показано на **рис. 4.4.4А**, GRE ($\varnothing = 2$ мм) було вставлено в плід томату разом із повною електрохімічною системою для забезпечення окиснення триптофану при +0,75 В після стадії збагачення. Концентрацію триптофану відстежували в зелених, жовтих, помаранчевих і червоних плодах томату. Сигнал окиснення стабілізувався після 15 сканувань. Було виявлено, що вміст триптофану в плодах чері-тому значно залежить від стадії їхнього дозрівання — від 4,40 до 23,25 мкМ. Проте спостерігалися суттєві відмінності у вмісті триптофану в плодах томату порівняно з томатним соком, що можна пояснити опором тканини плоду до введення сенсора, який дозволяє виявляти триптофан лише при безпосередньому контакті з поверхнею плоду. Крім того, встановлено, що абсцизова кислота, яка є інгібітором росту рослин, інтерферує з визначенням триптофану за допомогою цього сенсора.

GRE ($\varnothing = 2$ мм) також використовувався для створення імплантованого біосенсора для виявлення глутамату в плодах огірка. GRE було модифіковано наночастинками платини та плівкою полі(м-фенілендіаміну) для покращення переносу електронів на поверхні електрода та усунення інтерференції з боку аніонів відповідно. Для забезпечення селективного виявлення глутамату серед інших молекул використовувався фермент глутаматоксидаза, який каталізує окиснення глутамату з утворенням пероксиду водню (H_2O_2). Біосенсор продемонстрував добру селективність і стабільність з лінійним діапазоном 2–550 мкМ та межею виявлення 0,536 мкМ. Для практичного застосування біосенсор було імплантовано в плід огірка, як показано на **рис. 4.4.4В**. Дослідження проводилося шляхом введення в плід різних концентрацій глутамату в межах 0,1–5 мкМ перед проведенням амперометричних вимірювань при +0,4 В. Введення глутамату спричиняло збільшення струмового сигналу, що свідчить про ефективне виявлення аналіту.

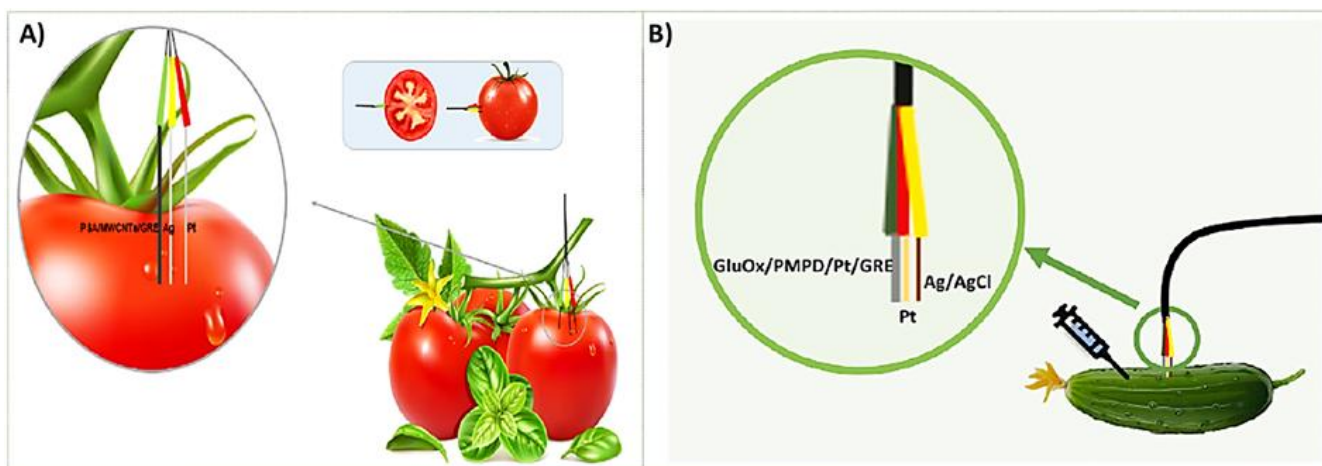


Рис. 4.4.4. А) Імплантований мініатюризований електрохімічний сенсор на основі графітового електрода, модифікованого багатошаровими вуглецевими нанотрубками та плівкою полі(сульфосаліцилової кислоти), для *in vivo* виявлення триптофану в плодах томату; В) Імплантований ензиматичний сенсор, модифікований наночастинками платини та плівкою полі(м-фенілендіаміну), для виявлення глютамату в плодах огірка.

4.4.2.4. Стресові біомаркери

4.4.2.4.1. Носимі (біо)сенсори

Глюкоза є основним метаболітом рослин і відіграє ключову роль у регуляції різноманітних клітинних процесів — від проростання до старіння. Моніторинг вмісту глюкози дозволяє в реальному часі відстежувати метаболічну відповідь рослини на стресові умови. З цією метою було розроблено носиму систему *in vivo* на основі реверсивного іонтофорезу (RI) та ферментного глюкозного біосенсора. Біосенсор складається з магнітного катода, що утримує іонтофоретичний електрод, і глюкозооксидазного сенсора, надрукованого на підкладці з поліетилентерефталату. Катод оснащено гідрогелем з полівінілового спирту, який слугує резервуаром і середовищем переносу для переміщення екстрагованої глюкози до поверхні біосенсора. Анодна магнітна частина містить позитивний полюс іонтофоретичної системи. Щоб уникнути механічного пошкодження листків, з обох боків іонтофоретичної системи було використано агарозний гідрогель (рис. 4.4.5А). За допомогою двох магнітних елементів і медичної стрічки система екстракції та сенсорювання надійно закріплюється на листку. Потік глюкози відбувався від листка до поверхні сенсора за допомогою хронопотенціометричних вимірювань упродовж 10 хвилин при густині струму 0.2 mA/cm^2 . Система успішно застосовувалась для аналізу впливу довжин хвиль світла (флуоресцентне, синє, червоне) та температурного стресу ($10\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$) на фотосинтетичну активність рослин, таких як перець солодкий, салат ромейн та гербера. Конструкція типу «сендвіч» на магнітах забезпечує легке встановлення та зняття сенсора без пошкодження листкової поверхні. Крім того, захист чутливої поверхні біосенсора від зовнішніх впливів робить його придатним для довготривалого моніторингу глюкози у рослинах.

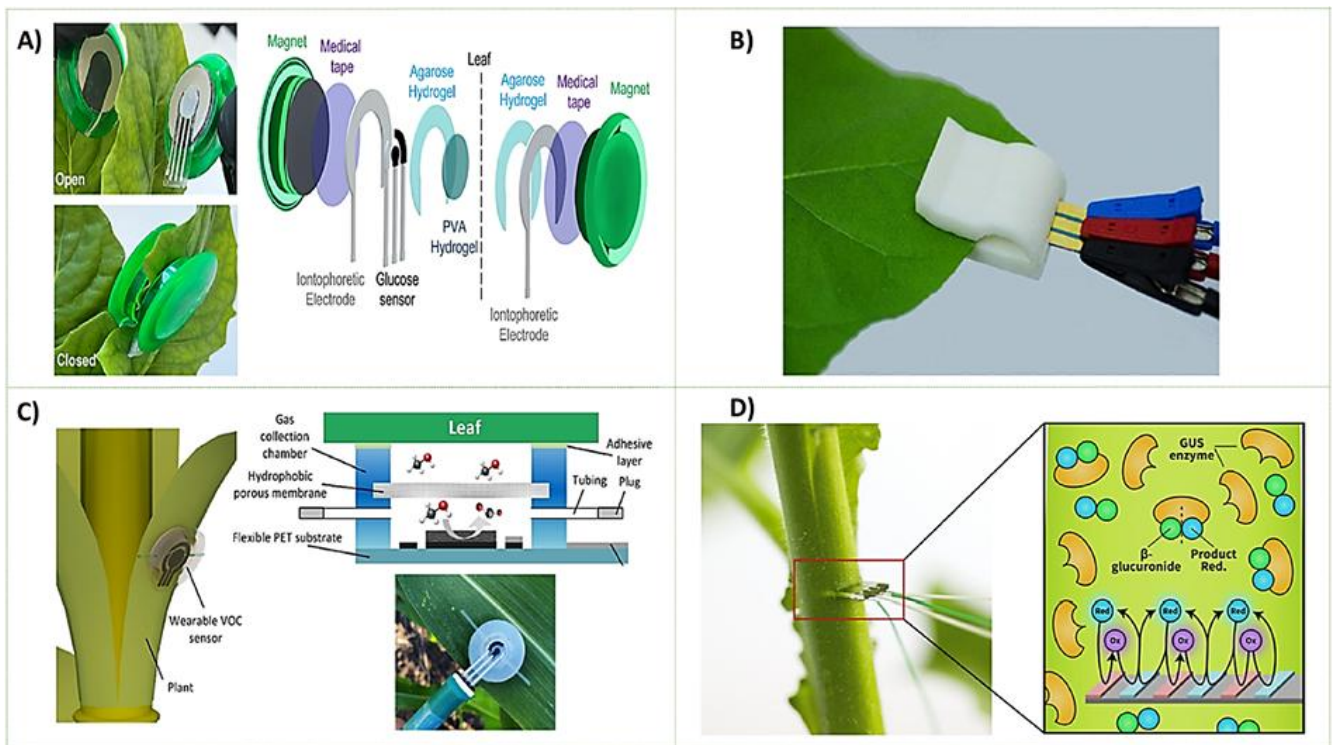


Рис. 4.4.5 А) Носимий електрохімічний біосенсор для моніторингу глюкози в листках, виготовлений на підкладці з поліетилентерефталату з інтегрованою системою екстракції глюкози за допомогою зворотного іонтофорезу; В) Тримач, надрукований на 3D-принтері, що фіксує мікрочип із трьома електродами на нижньому боці листка для *in vivo*-моніторингу активності β -глюкуронідази під час стресу; С) Носимий сенсор летких органічних сполук, виготовлений на основі поліетилентерефталату та модифікований композитом полі(2-аміно-1,3,4-тіадіазолу) з наночастинками платини для виявлення метанолу під час абіотичного стресу; D) Імплантований електрохімічний планарний чип, введений у стебло рослини для моніторингу експресії β -глюкуронідази під час стресу.

Вираз певних ферментів також може бути індикатором стресових умов. Наприклад, β -глюкуронідаза — універсальний маркер експресії генів, який активується у відповідь на стрес та старіння. Для визначення активності цього ферменту в листках тютюну вивчалася його здатність каталізувати субстрат р-нітрофенол з утворенням електроактивного продукту. Система *in vivo* передбачає фіксацію мікрочипа з трьома золотими електродами на листку рослини за допомогою полідиметилсилоксану (рис. 4.4.5В). Умови стресу (40 °С протягом 2 годин) сприяють експресії β -глюкуронідази, що каталізує перетворення субстрату з утворенням фосфату, який виходить з клітини і окислюється на робочому електроді в режимі хроноамперометрії. Попередні досліди *in vitro* з клітинами MSK8, що експресують цей фермент, дозволили досягти межі виявлення на рівні 0.1 мМ. Подальші *in vivo* дослідження на рослинах *Nicotiana tabacum* показали значне зростання струму в результаті теплового шоку, що свідчить про підвищену експресію β -глюкуронідази.

Рівень стресу в рослинах також можна визначити за леткими органічними сполуками, які вони виділяють (наприклад, метанол) як захисну відповідь на мікробне зараження. Для цього була створена трьохелектродна система на підкладці з поліетилентерефталату, де робочий електрод модифіковано композитом із провідного полі(2-аміно-1,3,4-гіадіазолу) та наночастинок платини, що забезпечують ефективне електрохімічне окиснення метанолу при потенціалі +0.47 В. Система розміщена в мініатюрній камері для збору газів, яка оснащена гідрофобною мембраною для дифузії газу, що мінімізує вплив вологи (рис. 4.4.5С). Сенсор фіксував різницю у виділенні метанолу між нижніми (9.4 ± 4.8 ppm) та верхніми (22.6 ± 5.7 ppm) листками кукурудзи в тепличних умовах. У польових умовах сенсор виявив значну різницю концентрації метанолу — від 34.5 ± 24.8 до 51.4 ± 27.2 ppm — між двома генотипами кукурудзи (лінії Mo17 та B73), підтверджуючи придатність розробленого сенсора для моніторингу метанолу у газовій фазі. На відміну від методів, що потребують екстракції, таких як газова хромато-мас-спектрометрія, ця технологія не вимагає складного лабораторного обладнання і дозволяє здійснювати моніторинг безпосередньо на рослині.

4.4.2.4.2. Імплантовані (біо)сенсори

Моніторинг глюкози в рослинах також здійснювали за допомогою мікроголкового біосенсора з отвором діаметром 300 мкм, що зменшує пошкодження рослини при проникненні крізь кутикулу. Електрохімічна система, яка становить внутрішній компонент біосенсора, включає мікродроти робочого, допоміжного та довідкового електродів. Робочий електрод — це платиновий дріт, модифікований наночастинками золота, Nafion, глюкозооксидазою та поліуретаном. Біосенсор зібраний шляхом інкапсуляції електродів у форму мікроголки, виготовлену за допомогою 3D-друку.

Спершу здатність мікроголкового сенсора виявляти глюкозу перевіряли *in vitro* методом хроноамперометрії при потенціалі +0.7 В. Діапазон визначення становив від 100 мкМ до 100 мМ, межа виявлення — 33.3 мкМ, також було продемонстровано високу селективність у присутності сторонніх речовин. Аналіз розчинів із подрібнених стебел томатів, підсилених глюкозою (100 мкМ та 5 мМ), засвідчив відновлення в межах 92–118 %, що підтверджує можливість роботи біосенсора навіть у складній матриці.

Для *in vivo* моніторингу глюкози біосенсор було введено в стебла томатів і листки Aloe vera на 12 годин. Отримані результати показали, що сила струму, яку реєструє сенсор, змінюється залежно від фотосинтетичної активності: уночі (коли глюкоза споживається) струм низький, удень (при синтезі глюкози) — високий. Також зафіксовано зниження сигналу у томатів, вирощених в умовах сольового стресу, що пов'язано з інгібуванням фотосинтезу.

Таким чином, мікроголковий біосенсор демонструє значний потенціал для моніторингу глюкози в реальному часі. Основні труднощі — варіативна концентрація глюкози в різних частинах рослини та її можливе переміщення внаслідок транспорту ксилемою та флоемою.

Імплантовані сенсори також використовували для оцінки експресії ферменту β -глюкуронідази в умовах стресу. Планарний чип було виготовлено на скляній підкладці з можливістю перпендикулярного введення в стебло рослини (рис. 4.4.5D). Після додавання субстрату 4-нітрофеніл- β -D-глюкопіранозиду в зріз стебла, фермент вивільняв п-нітрофенол, який детектували через 10 хв методом циклічної вольтамперометрії. Такі імплантовані сенсори є механічно стабільнішими та менш чутливими до змін навколишнього середовища порівняно з листовими сенсорами. Водночас, протягом декількох хвилин спостерігалось зниження сигналу, імовірно через відкриту систему стебла, в якій продукти реакції можуть швидко віддалятися від електрода завдяки руху рідини по судинних тканинах.

4.4.2.5. Активні форми кисню (АФК) та споріднені сполуки

4.4.2.5.1. Носимі (біо)сенсори

Окрім раніше згаданих фітогормонів, реактивні форми кисню (ROS) є класом сигнальних молекул, які утворюються на початкових етапах відповіді рослин на стрес. Ці ROS можуть проходити через клітини рослин під час трансдукції сигналу, викликаючи перехід від нормального стану росту до стресового стану в різних клітинах і тканинах. Однак надмірна кількість ROS призводить до окисного вибуху і пошкодження біомолекул. Це ушкодження негативно впливає на ріст, розвиток і зрештою виживання рослин.

Галієва кислота (GA) — це відома поліфенольна органічна сполука, яка присутня в рослинах. Вона має сильні антиоксидантні властивості, які допомагають усувати надлишок ROS і, відповідно, пом'якшувати окисний стрес у рослин. Для визначення GA у листках полуниці використовували носимий сенсор, який складається з гнучких електродів на основі лазерно-індукованого графену (LIG) у формі серпантину, приклеєних до листя. Окиснення GA здійснювали на електродах, модифікованих MXene/дисульфідом молібдену, на яких синергетичний ефект цих двох матеріалів разом із графеном покращував провідність та електрокаталітичні властивості сенсора. Пік окиснення GA спостерігався при +0,35 В у середовищі з рН 3, а відповіді DPV показали межу виявлення 0,625 у аналітичному діапазоні 1–1000 мкМ. Розроблений сенсор проявив селективність щодо 13 заважаючих молекул, високу відтворюваність (RSD = 4,43 %) і прийнятну стабільність при зберіганні протягом 14 днів. Серпантиноподібний сенсор мав оптимальні розтягувальні властивості, що сприяло його приляганню до нижньої поверхні листя полуниці, як показано на рис. 4.4.6A, для *in vivo* моніторингу GA при соляному стресі. Створення невеликого отвору у листі дало змогу GA рухатися до поверхні електрода, при цьому додавали 20 μ L PBS (рН 3). Результати показали, що при 0 мМ і 100 мМ NaCl вміст GA у листках полуниці становив $12,99 \pm 4,76$ і $38,65 \pm 15,96$ мкМ відповідно, що підтверджує, що рослини під час соляного стресу посилюють синтез фенольних сполук для зменшення окисного стресу. Проте додавання буферного розчину до отвору перед аналізом призвело до розведення аналіту і, як наслідок, заниження реального вмісту GA.

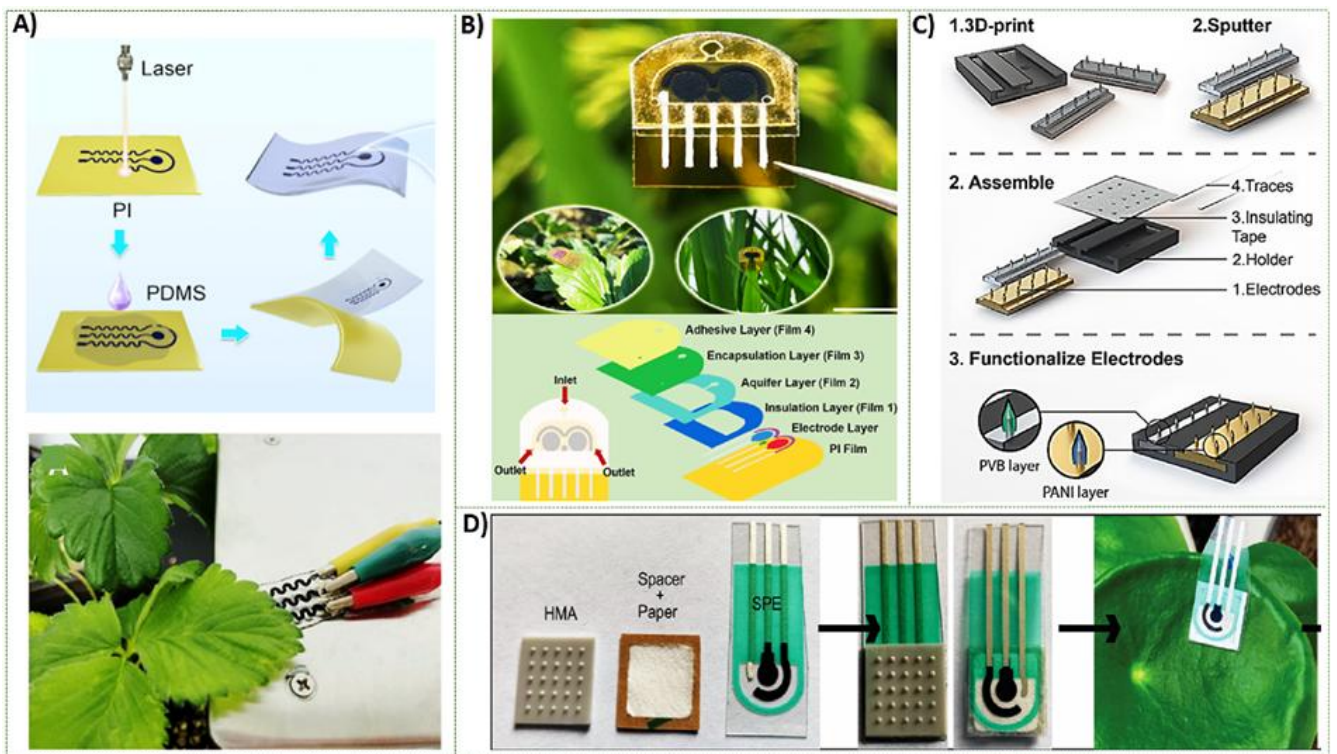


Рис. 4.4.6. А) Носимий та гнучкий сенсор на основі лазерно-індукованого графену для виявлення галієвої кислоти у листках полуниці. В) Носимий електрохімічний сенсор для мультиплексного моніторингу рН, саліцилової кислоти та неонікотиноїдного інсектициду у рослинній гуттації. С) Електрохімічний сенсор на основі 3D-мікроніделі для моніторингу рН у соку листа. D) Біосенсор на основі трафаретно-друкованих електродів, поєднаний із 3D-друкованим патчем з порожнистими мікроніделями для аналізу рослинних молекул.

Гліцин бетаїн (GB) — біологічно активна молекула, присутня у багатьох видах рослин. Його біосинтез часто ініціюється абіотичним стресом (наприклад, сіллю, посухою, низькою температурою) і він відіграє важливу роль у запобіганні накопиченню ROS. Визначення GB *in vivo* у рослинах було здійснене за допомогою MIP-біосенсора, виготовленого на трафаретних електродах (SPE). Виготовлення MIP-біосенсора проходило послідовно: (i) електроосадження золотих наночастинок (AuNPs) на SPE для підвищення провідності; (ii) електрополімеризація тіоніну (Thi) — молекули опорного сигналу — на AuNPs-SPE; (iii) модифікація рThi/AuNPs/SPE MIP-шаром, який було отримано полімеризацією дофаміну у лужному середовищі на багатошарових вуглецевих нанотрубках (MWCNTs) в присутності GB. Принцип роботи біосенсора ґрунтується на контролі піку окиснення Thi при $-0,3$ В за допомогою DPV. Струмова відповідь Thi поступово знижувалась зі збільшенням концентрації GB, що пояснюється заповненням імпринтованих пор молекулами GB. Біосенсор продемонстрував межу виявлення $0,707$ фемтомолів при інкубації 10 хв у діапазоні 1 фМ– 10 мМ. Також біосенсор показав високу селективність серед восьми заважаючих молекул, хорошу повторюваність ($RSD = 8\%$) і стабільність протягом 14 днів.

Для *in vivo* визначення на поверхні листя огірка робили невеликі отвори, до яких міцно прикріплювали біосенсор за допомогою клейкої стрічки. Додавання 20 μL фосфатного буфера до отвору забезпечувало рух GB із листя до робочого електрода. Результати показали, що концентрація GB у листках огірка, вирощених за умов соляного стресу, становила $6,61 \pm 0,83 \mu\text{M}$, у порівнянні з $2,43 \pm 0,36 \mu\text{M}$ без соляного стресу. Знову ж таки, додавання PBS для забезпечення електрохімічного аналізу призводило до розведення аналіту і, відповідно, до значного зниження реального вмісту GB — у сотні разів менше за результати, отримані за допомогою HPLC. Метод стандартних додавань було застосовано в тестах на відновлення, щоб підтвердити практичну корисність біосенсора для листків огірка. Відновлення при додаванні стандартного розчину GB у сік огірка були дуже хорошими — 96,97 %–107,09 %. Однак слід зауважити, що сік для тестування отримували з подрібнених плодів огірка, а не з листя, яке має інший склад. Крім того, використання стандартних SPE обмежує застосування біосенсора до рослин із плоскими поверхнями, виключаючи стебла та плоди, які можуть містити більше GB у порівнянні з листям і, отже, забезпечувати більш надійні результати.

4.4.2.5.2. Імплантовані сенсори

Серед різних реактивних форм кисню (ROS) перекис водню (H_2O_2) є особливо важливим медіатором швидких системних сигналів у рослинах завдяки його тривалому періоду напіврозпаду та здатності до транспорту на великі відстані й через мембрани. У цьому контексті було розроблено новий імплантований мікросенсор для безперервного моніторингу H_2O_2 у стеблах томатів.

Мікросенсор складається з трьох пористих мікроелектродів на основі лазерно-індукованого графену (LIG), модифікованих електрокаталітичними наночастинками платини та плівкою Nafion, що забезпечує електрохімічне окислення H_2O_2 при потенціалі +0,6 В за допомогою хронопотенціометрії. Для автономного живлення сенсора використано фотогальванічний модуль у поєднанні з модулем збору та передачі даних, який здатен збирати світло у рослинному середовищі та безперервно жити мікросенсор.

За оптимальних умов детекції мікросенсор продемонстрував межу виявлення $0,35 \mu\text{M}$ у лінійному діапазоні 2–200 μM . Нанесення плівки Nafion на робочі та референтні електроди підвищило селективність сенсора у присутності різних перешкод (наприклад, аскорбінової кислоти), зберігаючи стабільність роботи у широкому діапазоні pH (від 5 до 8).

Автономна система моніторингу використовувалась для відстеження динаміки рівня H_2O_2 у томатах в реальному часі під впливом осмотичного, ультрафіолетового та механічного стресів. Для вставки мікросенсора у стебло томату було зроблено розріз довжиною 2 мм. Концентрація H_2O_2 , що генерувалась під різними стресами, коливалась у діапазоні 10–100 μM . Сигнал H_2O_2 при осмотичному стресі зберігався протягом 10 годин, тоді як при УФ-стресі — 10 хвилин, а при механічному — лише 10 секунд. Це свідчить про

здатність томатів ефективно протистояти деяким механічним впливам під час нормального росту. Водночас при сильному осмотичному стресі та УФ-випромінюванні рослини виробляють високі концентрації H_2O_2 для захисту від ушкоджень, викликаних стресом.

У цьому дослідженні мікросенсор продемонстрував свою здатність моніторити рівень H_2O_2 у стеблах томатів під абіотичним стресом. Однак присутність пероксидази в флоемі та ксилемі рослини значно впливала на результати вимірювань. Крім того, сенсор показав покращену аналітичну роботу при підвищених температурах, але був чутливий до зовнішніх факторів, таких як вітер, контакт і спосіб вставлення сенсора у стебло.

4.4.2.6. рН

4.4.2.6.1. Носимі сенсори

Моніторинг рівня рН у рослинах є важливим аспектом рослинної біології, оскільки він допомагає зрозуміти фізіологічний стан рослини та виявити можливі проблеми зі здоров'ям. Зміни внутрішнього рН рослини мають суттєвий вплив на різні фізіологічні процеси, включаючи ріст, поглинання поживних речовин, активність ферментів, стійкість до стресів та якість кінцевих метаболітів.

У цьому контексті було розроблено безконтактний носимий електрохімічний сенсор для моніторингу рівня рН разом із саліциловою кислотою та неонікотиноїдним інсектицидом у листках рослин шляхом аналізу крапель гуттації рослин. Електроди сенсора виготовлялися методом друку лазерно-індукованого графену (LIG) і склалися з контрелектрода, референтного електрода та трьох робочих електродів: два неретформовані електроди для визначення саліцилової кислоти та інсектициду, а третій — модифікований шаром поліаніліну для моніторингу змін рН.

Для забезпечення достатнього об'єму гуттаційної рідини для електрохімічного аналізу було створено модуль збору гуттаційної рідини, який розташовувався на листку рослини. Як показано на **рис. 4.4.6В**, збірка плівок поліетилентерефталату утворювала шар для зберігання рідини (плівка 2), ущільнювальну плівку для гуттаційного шару (плівка 3) та шар для з'єднання гуттаційної рідини з листками рослини (плівка 4). Загальний об'єм камери для зберігання рідини становив 26,4 мкл.

Моніторинг саліцилової кислоти при потенціалі +0,5 В та неонікотиноїдного інсектициду при -1,15 В за допомогою квадратурного імпульсного вольтамперметричного методу (SWV) показав задовільну лінійну залежність між концентрацією аналізованої речовини та піковим сигналом у діапазонах 0–13,8 мг/л для саліцилової кислоти та 0–50 мг/л для інсектициду. Крім того, було зафіксовано високу селективність для обох аналізованих речовин навіть у присутності численних перешкод.

Вивчення відтворюваності та повторюваності сенсора показало коефіцієнти варіації (RSD) менше ніж 5,1 % для саліцилової кислоти та 11,6 % для інсектициду. Хронопотенціометричне тестування сенсора рН у діапазоні від

4,5 до 8,5 дало добру чутливість – 47 мВ/рН, а також хорошу стабільність протягом 50 секунд.

Сенсор було закріплено на листках рису, вирощеного в умовах сольового стресу. Аналіз гуттаційної рідини показав, що концентрація інсектициду спочатку зростала у перші дні впливу, а потім знижувалась. Це явище можна пояснити здатністю рослини виводити інсектицид. Подібна тенденція спостерігалася для саліцилової кислоти, що свідчить про здатність рослини протистояти сольовому стресу, припиняючи синтез саліцилової кислоти.

Однак профілювання рН рослини показало випадкові коливання, навіть якщо рослина вирощувалась у контрольованих умовах, що свідчить про необхідність значних удосконалень розробленого сенсора для повного розуміння фізіологічних реакцій рослини.

4.4.2.6.2. Імплантовані сенсори

Окрім носимих сенсорів, було створено потенціометричний сенсор на основі 3D-друку твердих мікроголок для безперервного моніторингу коливань рН у рослинах під впливом абіотичного стресу. Як показано на **рис. 4.4.6С**, дві решітки мікроголок надруковані за допомогою стереолітографії, а потім осаджені золотом і сріблом, утворюючи робочий і референтний електроди відповідно. Для забезпечення чутливості сенсора до зміни рН на робочий електрод електродепонували поліанілін. Натомість на референтний електрод методом крапельного нанесення було нанесено плівку полівінілбутиралу, що забезпечує стабільність потенціалу незалежно від складу рослинного соку. Після складання системи у вигляді двох електродів-мікроголок інтегрували плоский друкований конектор для зручного підключення до потенціостата.

Електрохімічна оцінка сенсора в буферних розчинах Бріттона-Робінсона (рН 4–8) показала час відгуку менше ніж 50 секунд для досягнення 90 % сигналу, відмінну лінійність (майже ернштєнівський нахил близько $-57,2$ мВ/рН), високу селективність, хорошу оборотність і невеликий вплив температури. Також сенсор тестували у рослинному соку, витягнутому з листків, де криві калібрування до і після аналізу соку співпадали, що свідчить про відсутність впливу матриці соку на вимір рН.

Застосування сенсора *in vivo* досліджували на рослинних листках за умов посухи та поливу. Мікроголки надійно кріпили до листя за допомогою стрічки або магніту. Пірсинг двох сенсорів (1 та 2) на різних листках однієї рослини показав середню різницю в $0,085 \pm 0,079$ одиниць рН, що свідчить про високу відтворюваність. Початковий рівень рН під час *in vivo* тесту становив 5,61 та 5,68 для сенсорів 1 і 2 відповідно, що близько до значень рН, виміряних *ex vivo* (5,71 та 5,47).

Мікроголковий сенсор зміг фіксувати варіації рН у відповідь на зміну навколишніх умов (посуха і полив). Під час посухи спостерігали менш кислий рН ($6,93 \pm 0,34$) порівняно з початком стресу ($5,34 \pm 0,28$). Полив викликав зниження рН до $6,12 \pm 0,23$, що свідчить про відновлення нормального стану. Подібні результати отримали й на іншому виді рослин, підтверджуючи

корисність сенсора для моніторингу рН *in vivo*. Втім, потрібно вирішувати проблему потенційного дрейфу сигналу, що є типовою проблемою потенціометричних сенсорів.

Ті ж дослідники розробили недорогий 3D-друкований патч із порожнистих мікроголок у поєднанні з поліефірними екранними друкованими (біо)сенсорами для визначення рН, H_2O_2 і глюкози в рослинах за допомогою окремих сенсорів. Як показано на рисунку 6D, патч із мікроголками функціонує як пристрій для відбору проб рослинної рідини шляхом натиску великого пальця, що забезпечує її потік до фільтрувального паперу, а потім до поверхні сенсора. Для визначення різних аналітів сенсори модифікували шляхом електродепонування поліаніліну (рН), пруської сині (H_2O_2) або пруської сині з глюкозооксидазою (глюкоза). Аналітичну характеристику кожного сенсора вже було проведено раніше.

In vivo оцінку (біо)сенсорів виконували, проколюючи листя різних рослин (*Pilea peperomioides*, *Curio rowleyanus*, *Zamioculcas zamiifolia*, *Echeveria Raindrops*) патчем із мікроголками. Визначали рН апопластної рідини цих рослин із діапазоном від 5,2 до 6,1. Найбільша кислотність була у рослини №4 (рН $5,2 \pm 0,1$), а найнижча – у рослини №3 (рН $6,1 \pm 0,2$). Хронопотенціограми H_2O_2 показали суттєву різницю ($40,5 \pm 1,7 \%$) між двома методами відбору проб у рослини №1, що можливо пов'язано з затримкою аналізу, натомість у рослини №4 різниця була мінімальна ($12,5 \pm 0,9 \%$). Аналіз глюкози виявив варіації $3,6 \pm 3,2 \%$ і $5,7 \pm 5,6 \%$ між двома методами для рослин №1 і №4 відповідно.

Це дослідження піднімає кілька питань для подальшого вивчення. По-перше, потрібно з'ясувати придатність конфігурації мікроголок для ефективного відбору циркулюючих у рослині молекул, оскільки для H_2O_2 отримано різні значення. По-друге, варто визначити, чи можна цю конфігурацію використовувати для відбору інших аналізованих речовин. По-третє, слід враховувати відмінності в концентраціях аналізованих речовин у листках, стеблах і інших частинах рослини. І нарешті, необхідно оцінити придатність системи (мікроголки в поєднанні з поліефірними екранними електродами) для роботи на нерівних і вигнутих поверхнях рослин.

4.4.3. Обговорення та висновки

Нещодавно зросла зацікавленість у використанні носимих і імплантованих (біо)сенсорів для розуміння змін у навколишньому середовищі рослин, таких як надмірне застосування агрохімікатів та стресові умови.

Носимі (біо)сенсори призначені для безпосереднього кріплення на поверхні рослин — плодах, листках, стеблах. Вони зазвичай є гнучкими та еластичними, для їх виготовлення застосовують матеріали з високою міцністю і хімічною стійкістю. Серед таких матеріалів — целюлоза (ацетат целюлози, пергаментний і офісний папір), деревна целюлоза (крафт-папір), вуглецеві матеріали (вуглецева стрічка, лазерно індукований графен) та термопластики (поліетилентерефталат, полілактид). Ці матеріали дозволяють сенсорам гнутися подібно до гнучкої шкіри, адаптуючись до поверхонь з радіусом кривизни менш ніж 100 мкм. Носимі сенсори можна модифікувати нановолокнами і

наночастинками (золотими, платиновими, вуглецевими нанотрубками, Prussian blue) для підвищення їх електрохімічної чутливості, не порушуючи функціонування рослин.

Проте використання гнучких сенсорів на недорогих субстратах може не відображати точну концентрацію цільових молекул у рослині. Наприклад, заздалегідь виготовлені електроди можуть погано адаптуватися до нерівних поверхонь, що впливає на якість даних. Часто аналіт наносять на поверхню сенсора або розбавляють буферним розчином для електрохімічних вимірювань, що також впливає на точність. Легкі матеріали можуть не витримувати змін зовнішніх умов (вітер, дощ) без надійного кріплення. Однак носимі сенсори можуть ефективно виявляти леткі молекули (наприклад, метанол), не потребуючи складних систем екстракції. У медицині подібні гнучкі датчики використовують для реєстрації змін тиску в режимі реального часу. Також рослинні носимі сенсори можуть допомогти моніторити надмірне застосування пестицидів, визначаючи їх концентрацію в аерозольній фазі.

Альтернативою є імплантовані електрохімічні сенсори, які безпосередньо вводять у рослину. Зазвичай вони виготовлені з корозійностійких і високопровідних матеріалів — вольфрамів, нержавіючі або золоті дроти, склокарбон, графітові електроди. Рігидні матеріали товщиною від 0,2 до 2 мм дозволяють сформувати триелектродну систему, яку можна вставити в рослину без значного пошкодження. Перевага імплантованих сенсорів — можливість точного виміру концентрації цільових речовин всередині рослини без додаткового нанесення або розпилення аналіту. Втім, варто обережно вводити сенсори, щоб не заважати росту рослини чи не викликати старіння. Крім того, результати можуть бути спотворені рухом ксилеми і флоєми, що переміщують речовини в стеблі. Зазвичай жорсткі сенсори придатні для використання в стеблах дорослих рослин, але не в листках, тонких стеблах чи ніжних сіянцях.

Окрім сенсорів, виготовлених поза рослиною, ключові речовини можна контролювати сенсорами, нанесеними безпосередньо на поверхню рослин (наприклад, для виявлення метилпаратіону та нітратів). Проте такий спосіб менш зручний для децентралізованих застосувань через необхідність приготування, нанесення та висушування чорнила.

Незважаючи на науковий прогрес і потенціал застосувань, використання електрохімічних (біо)сенсорів для моніторингу здоров'я рослин все ще недостатньо розвинене і потребує вдосконалення технологій. Головною перешкодою є необхідність підвищення надійності і стабільності роботи сенсорів протягом тривалого часу. Більшість існуючих (біо)сенсорів тестували в контрольованих умовах, де їх міцно кріпили на рослинах або імплантували в стебла для короткочасного моніторингу. Проте польовий аналіз із його змінами температури, вологості, вітру і комах безумовно вплине на роботу не надто міцних сенсорів. Важливо також поширити застосування на різні види рослин, оскільки більшість досліджень зосереджено на повторних зразках одних і тих же культур (помідори, огірки, яблука). При виготовленні сенсорів треба ретельно підбирати матеріали і наномодифікатори, щоб мінімізувати вплив на ріст рослин.

Також необхідно шукати баланс між вартістю і високою продуктивністю для комерційного застосування.

Для створення ефективного (біо)сенсора для моніторингу рослинного здоров'я потрібно виконати кілька умов. По-перше, сенсор має забезпечувати швидкий аналіз, бо цільові речовини швидко видаляються судинною системою рослини. По-друге, необхідні стабільні сигнали і відтворювані результати для точної оцінки. Потрібно також ретельно валідувати сенсори на різних видах рослин і різних частинах рослин через неоднорідний розподіл аналітів.

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) з рослинними сенсорами може надати додаткові цінні дані. Зокрема, ШІ може збирати і аналізувати інформацію з: (i) листових сенсорів для раннього виявлення стресів і прогнозування хвороб, (ii) світлових сенсорів для оптимізації умов освітлення у теплицях, (iii) сенсорів вологості для підтримки оптимального рівня вологи і керування зрошенням. Поєднання (біо)сенсорів і роботизованих систем на основі ШІ має великий потенціал підвищити ефективність і продуктивність сільського господарства. Роботи з такими сенсорами можуть адаптуватися до навколишніх умов, допомагаючи у висадці, прополюванні і збиранні врожаю. Це відкриває нову еру в агропродовольчих технологіях з перспективним майбутнім.

Крім застосування ШІ в роботах, його використання у розробці електрохімічних (біо)сенсорів може суттєво прискорити розвиток галузі. ШІ допоможе швидко підбирати відповідні сенсорні матеріали з великого набору залежно від стану рослини, умов довкілля та завдань. Це скорочує час досліджень і сприяє створенню надійних сенсорів — ключової проблеми у використанні рослинних (біо)сенсорів. Також ШІ ефективно обробляє великі масиви даних, що важливо, бо стан рослини залежить від багатьох біологічних, хімічних і фізичних факторів. Моніторинг усіх цих факторів одночасно потребує застосування множинних сенсорів для повного розуміння стану рослини. Окрім того, ШІ може програмувати (біо)сенсори, автоматично вмикаючи і вимикаючи їх за потреби. Це особливо корисно для безперервного тривалого моніторингу, де заміна сенсорів вручну небажана.

4.5 ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ

4.5.1 Огляд існуючих технічних рішень

У разі потреби реалізації підключення мікропроцесорного пристрою до мережі Ethernet можна скористатися низкою готових апаратних рішень, що відрізняються складністю, функціональністю та вартістю.

Перетворювач RS-232 — Ethernet

Одним із найпростіших способів інтеграції є застосування перетворювача інтерфейсу RS-232 у Ethernet, наприклад NetCom 111 від компанії VSCoM. Подібні пристрої, як правило, працюють у режимі віртуального COM-порту. Вони перетворюють потік даних із RS-232 у формат IP-пакетів на одному кінці

з'єднання та здійснюють їх приймання, декодування й передачу назад у форматі RS-232 — на іншому. Перевага такого рішення полягає у простоті налаштування та програмування. До недоліків слід віднести неможливість підтримки мережевих протоколів високого рівня, таких як SNMP, HTTP тощо.

Ethernet-модуль на базі мікросхеми WIZNET W5100

Ще одним варіантом є використання Arduino Ethernet Shield, побудованого на мікросхемі WIZNET W5100. Цей модуль дає змогу реалізувати простий веб-сервер або Telnet-керування для взаємодії з пристроєм. Його функціональність дозволяє інтегрувати пристрій до мережі з мінімальними витратами часу на розробку. Основними обмеженнями є невисока гнучкість (можна використовувати лише ті протоколи, які вже передбачені виробником), а також доволі висока вартість, яка в окремих випадках може перевищувати ціну самого мікроконтролера чи вбудованого пристрою.

Бюджетний модуль Mini ENC28J60 Ethernet

Більш доступне рішення — модуль Mini ENC28J60 Ethernet LAN, що базується на мікросхемі ENC28J60 з вбудованим Ethernet-роз'ємом HR911105A, який має гальванічну розв'язку та світлову індикацію. Передача даних здійснюється через синхронний послідовний інтерфейс SPI, який підтримується більшістю сучасних мікроконтролерів. Завдяки цьому модуль легко інтегрується в проекти на базі Arduino. Недоліком є потреба в окремому джерелі живлення на 3,3 В і досить високий струм споживання — до 250 мА, що вимагає встановлення додаткового стабілізатора.

4.5.2 Принципи реалізації Ethernet-підключення на основі сучасної елементної бази

Для побудови пристроїв із підтримкою Ethernet зазвичай до основного мікроконтролера додають зовнішній драйвер фізичного рівня — РНУ. Найчастіше використовується мікросхема ENC28J60, що відповідає стандарту 10BASE-T (див. **рис. 4.5.1**), або більш продуктивна ENC624J600 зі швидкістю 10/100 Мбіт/с, виробництва Microchip Technology Inc.. Інший підхід — використання мікроконтролерів серії PIC18FXXJXX, які вже мають вбудований модуль РНУ (**рис. 4.5.2**), що дозволяє реалізовувати мережеві функції без потреби в зовнішніх модулях.

Для обробки протоколів Ethernet можливо застосувати вже існуючі програмні стеки TCP/IP. На ринку представлений широкий вибір таких рішень для різних платформ.

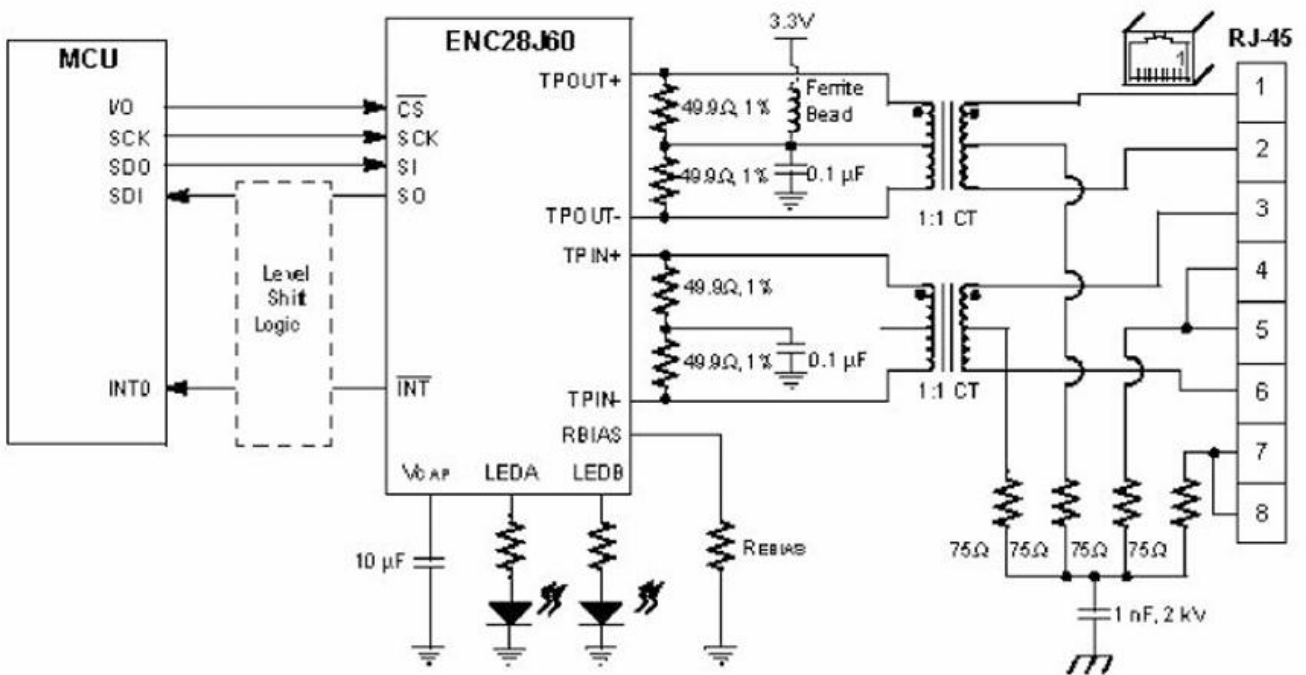


Рис. 4.5.1 Типова схема підключення ENC28J60

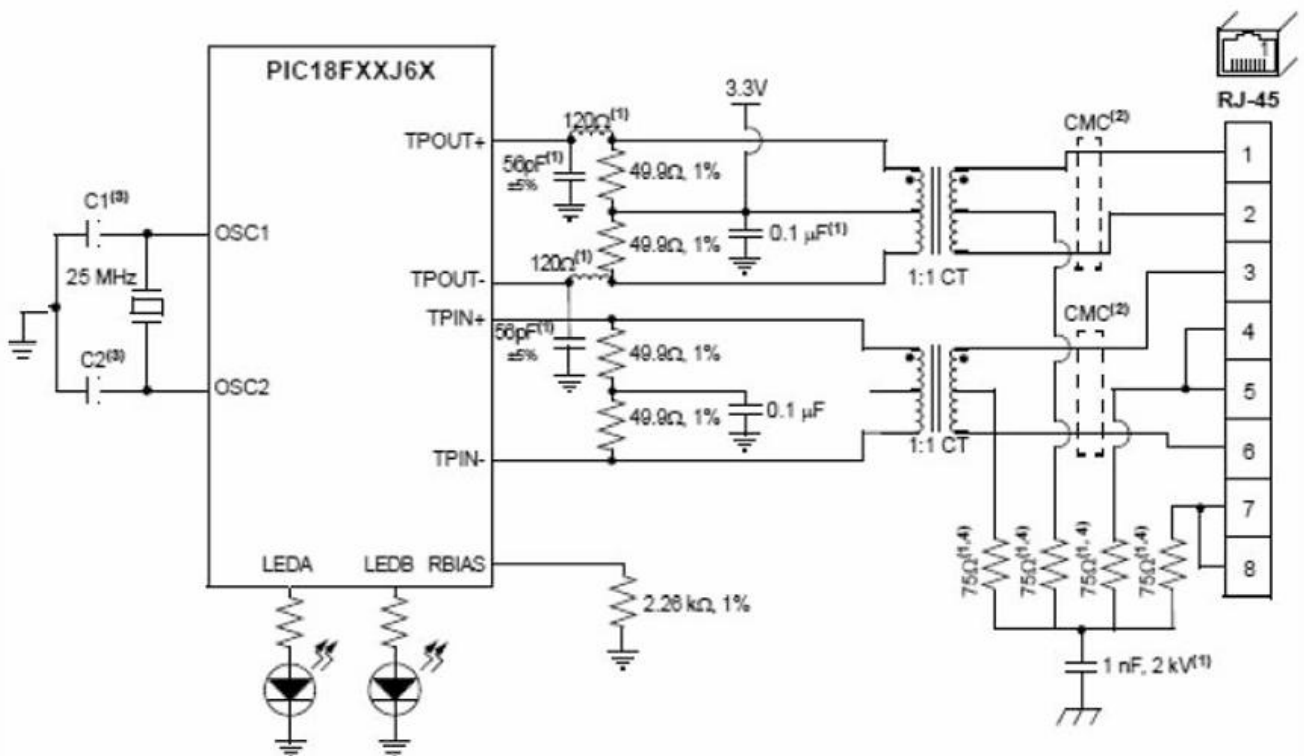


Рис. 4.5.2 Типова схема підключення PIC18FXXJXX

Основні блоки мікросхеми ENC28J60

На рис. 4.5.3 наведено функціональну структуру мікросхеми ENC28J60, що включає:

- PHY-рівень — реалізує фізичну взаємодію з середовищем передачі (витою парою відповідно до стандарту 10BASE-T), включаючи приймач, передавач та драйвери;

- Інтерфейс МІІ (Medium Independent Interface) — забезпечує доступ до РНУ через набір 16-бітних регістрів, специфічних для конкретного середовища передавання. Така реалізація дозволяє каналному рівню працювати незалежно від типу фізичного середовища;
- MAC-рівень (Medium Access Control) — виконує обробку кадрів Ethernet, включаючи адресацію, фільтрацію, обчислення контрольних сум, виявлення колізій (у напівдуплексному режимі) та обмін готовими пакетами з мережевим рівнем;
- Керуюча логіка — відповідає за управління буфером, енергоспоживанням та службовими режимами.

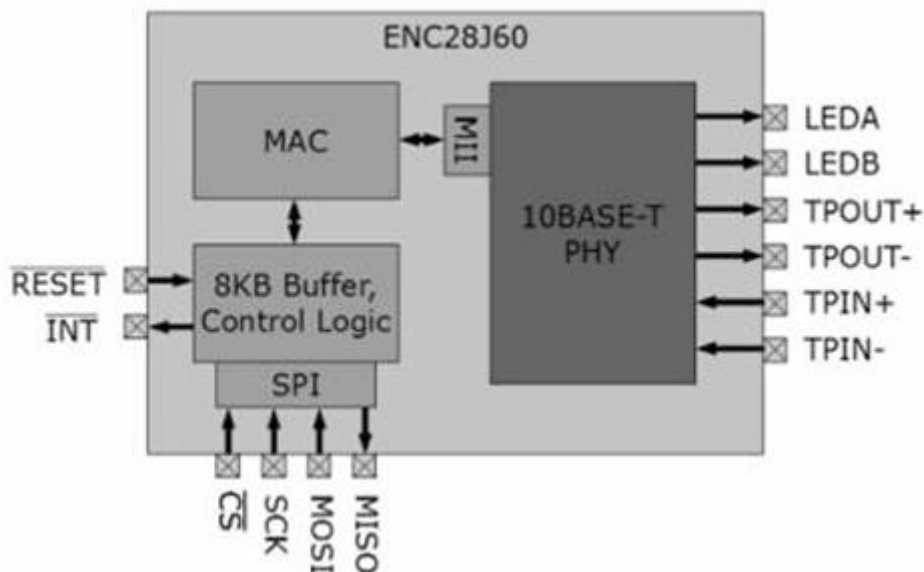


Рис. 4.5.3 Архітектура Ethernet — контролера ENC28J60

MAC-рівень та керуюча логіка. MAC (Medium Access Controller)

MAC-рівень (контролер доступу до середовища) відповідає за всі логічні операції, необхідні для передавання й приймання даних по мережі Ethernet. Зокрема, він виконує:

- адресацію кадрів;
- обчислення та перевірку контрольної суми;
- фільтрацію вхідних пакетів;
- обробку колізій (у разі роботи в напівдуплексному режимі).
- MAC взаємодіє з мережею двома способами:
- з мережевим рівнем — у вигляді сформованих Ethernet-пакетів;
- з фізичним рівнем — у вигляді «сирих» байтів, що передаються по фізичному середовищу (наприклад, кручена пара).

Окремо реалізована керуюча логіка, яка:

- обслуговує буфери прийому та передачі даних;
- забезпечує зберігання отриманих пакетів та підготовку до відправки;
- керує режимами енергозбереження та загальним функціонуванням мікросхеми.

Протокольна підтримка: TCP/IP-стек від Microchip

Microchip Technology Inc. надає відкриту бібліотеку TCP/IP-стека, яка підтримує широкий набір мережевих протоколів (див. рис.4.5.4), серед яких:

- базові мережеві протоколи: ARP, IP, ICMP, UDP, TCP;
- службові: DHCP, SNMP, SMTP, HTTP, FTP, TFTP;
- підтримка TCP і UDP з'єднань;
- SSL, NetBIOS, DNS.
- Бібліотека містить вихідні файли для:
- веб-сервера з підтримкою GET/POST запитів, SSL-автентифікації, GZIP-стиснення;
- клієнта й сервера ICMP, SNMP (версії 1, 2, 3, включаючи SNMP TRAP);
- програмного моста TCP2UART;
- Telnet-сервера;
- DynDNS-клієнта, DNS-клієнта, DHCP-сервера/клієнта.

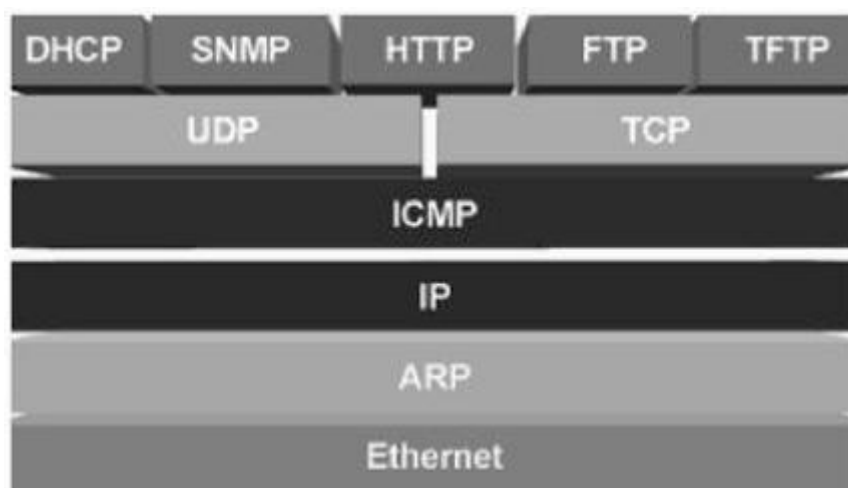


Рис. 4.5.4 Стек протоколів TCP/IP, який підтримується бібліотекою від Microchip Technology Inc.

Попри значний функціонал, стек є компактним. Наприклад, типовий проект, що включає:

- веб-сервер;
- клієнти DHCP та DNS;
- міст Ethernet–UART;
- сервери TFTP та SNMP;
- SMTP-клієнт

При цьому він потребує орієнтовно 33 КБ пам'яті програм (ROM) та 2 КБ оперативної пам'яті (RAM). Це дозволяє його використання навіть у відносно обмежених за ресурсами мікроконтролерах, наприклад PIC18F67J60, який має 128 КБ Flash-пам'яті.

Окрім стека TCP/IP, компанія Microchip Technology Inc. пропонує набір інструментів, які полегшують розробку вбудованих пристроїв з підтримкою Ethernet:

- Середовище розробки: доступні безкоштовні версії MPLab 8 (стабільна, але морально застаріла) та MPLab-X — сучасна IDE, що активно розвивається.
- Компілятори: офіційно підтримуються компілятори C18, C30 та C32. Доступна ознайомча 60-денна версія на сайті виробника.
- Програмувальники та налагоджувачі: найбільш поширені — ICD3 та PICkit3. Також можливе використання ICD2, проте він не підтримується MPLab-X і має нижчу швидкість роботи.

4.5.3 Готове рішення на базі налагодочної плати PIC WEB-EK

Для спрощення процесу розробки доцільним є використання готової налагодочної плати PIC WEB-EK, призначеної для мікроконтролера PIC18F97J60. Цей контролер має інтегрований 10BASE-T Ethernet, а також вбудовані модулі MAC і PHY, що дає змогу реалізовувати повноцінну Ethernet-функціональність без потреби в додаткових мікросхемах.

Фізичний рівень реалізовано безпосередньо в мікроконтролері, отже, трансформатор гальванічної розв'язки підключається безпосередньо до корпусу чипа. Для запуску системи достатньо лише роз'єму Ethernet, кварцового генератора та мінімальної обв'язки, що дозволяє реалізувати самодостатній веб-сервер з широким спектром застосувань в автоматизованих системах.

Налагодочна плата PIC WEB-EK підтримує:

- Моніторинг і керування вісьмома цифровими виходами;
- Керування двома релейними виходами (наприклад, для виконавчих механізмів);
- Зняття показників температури з вбудованого термодатчика (див. рис. 4.5.5).
- Потужний функціонал у поєднанні з невисокою вартістю дозволяє використовувати цю платформу в різноманітних проектах без потреби глибокого втручання в апаратну частину.
- Модифікація пристрою для конкретних задач, як правило, зводиться лише до перепрошивки мікроконтролера, що виконується через стандартний роз'єм ICSP з використанням будь-якого підтримуваного відлагоджувача, наприклад PICkit2 або PICkit3.

Додаткові можливості плати

- Годинник реального часу (RTC) з роз'ємом для батарейки дозволяє задавати робочі режими за календарем або тижневим графіком.
- Пам'ять EEPROM дає змогу зберігати лог-файли показників з сенсорів.
- Інтерфейс 1-Wire дає змогу підключати термодатчики типу DS18B20, які широко використовуються для вимірювання температури повітря, теплоносія тощо. При цьому декілька датчиків можуть працювати по одному проводу.
- Аналогові датчики (наприклад, Pt1000) також можуть бути підключені через виводи портів, усі з яких виведено на роз'єми плати.
- LCD-дисплей (типу 1602) і 5 кнопок дозволяють реалізувати інтерфейс користувача з функціями індикації параметрів і зміни налаштувань.
- П'єзодинамік забезпечує можливість звукового оповіщення про аварійні ситуації.

- Два релейних виходи дозволяють без додаткових елементів підключати електронагрівачі (до 5 А) або керувати сервоприводами (включно з реверсним режимом).

Розширення та масштабування

- 8 цифрових виходів мікроконтролера, доступних через клемник, дозволяють легко розширити систему, підключаючи, наприклад, релейні модулі Arduino.
- Вбудований інтерфейс RS-485 дозволяє створювати багатоконтролерні системи управління мікрокліматом, пов'язані за протоколом Modbus RTU.
- Інтерфейс RS-232 дозволяє підключення до теплолічильників, більшість з яких підтримують протокол M-Bus. Системи M-Bus широко застосовуються для дистанційного знімання показників із приладів обліку води, газу, тепла та електроенергії, особливо у країнах Європи.

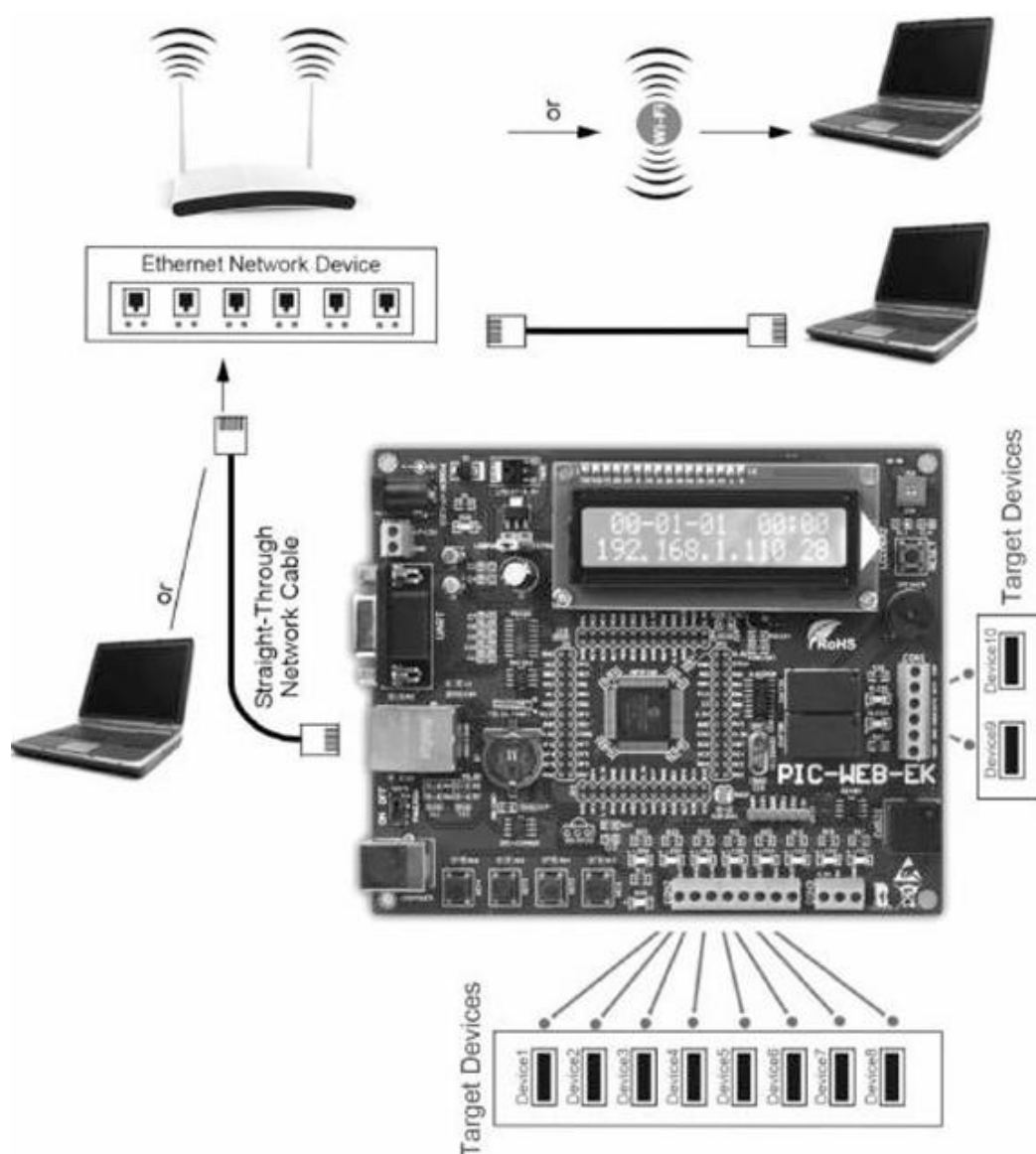


Рис. 4.5.5 Типова схема підключення PIC WEB-EK для контролера PIC18F97J6

Наявність на отладоочній платі стандартного інтерфейсу RS-232 дає змогу підключити до неї теплотлічильник, більшість з яких мають вихідний інтерфейс на основі протоколу M-Bus.

Протокол M-Bus (Meter-Bus) є широко поширеним рішенням у країнах Західної та Східної Європи для організації систем дистанційного зчитування даних з приладів обліку (вodomірів, лічильників газу, тепла та електроенергії), які встановлюються як у житлових будинках, так і на промислових об'єктах.

У типовій мережі M-Bus усі лічильники (відомі пристрої) з'єднуються паралельно двожилиним витим кабелем та підключаються до центрального вузла керування — M-Bus-мастера. У стандартній конфігурації мережа складається з одного ведучого пристрою (мастера) та одного або декількох підлеглих пристроїв (лічильників) (див. **рис. 4.5.6**).

Наприклад, компанія Danfoss пропонує серію M-Bus-мастерів Hydro-Center, розрахованих на підключення 25, 60 або 250 віддалених пристроїв. При цьому дальність зв'язку між мастером і лічильником може сягати 10 км і більше. Передача даних відбувається послідовно за захищеним від завад протоколом, що відповідає стандарту EN 1434.

Однією з особливостей M-Bus є живлення всіх підключених пристроїв безпосередньо від мережі, що спрощує реалізацію віддалених вузлів, проте потребує складніших схем для ведучого пристрою.

В Україні та зокрема в країнах пострадянського простору M-Bus не набув широкого поширення, що пов'язано з відсутністю централізованих систем автоматизованого зчитування даних. У житлових будинках теплотлічильники здебільшого встановлюються на рівні будинку або під'їзду, а не в кожній квартирі, як це реалізовано в Європі.

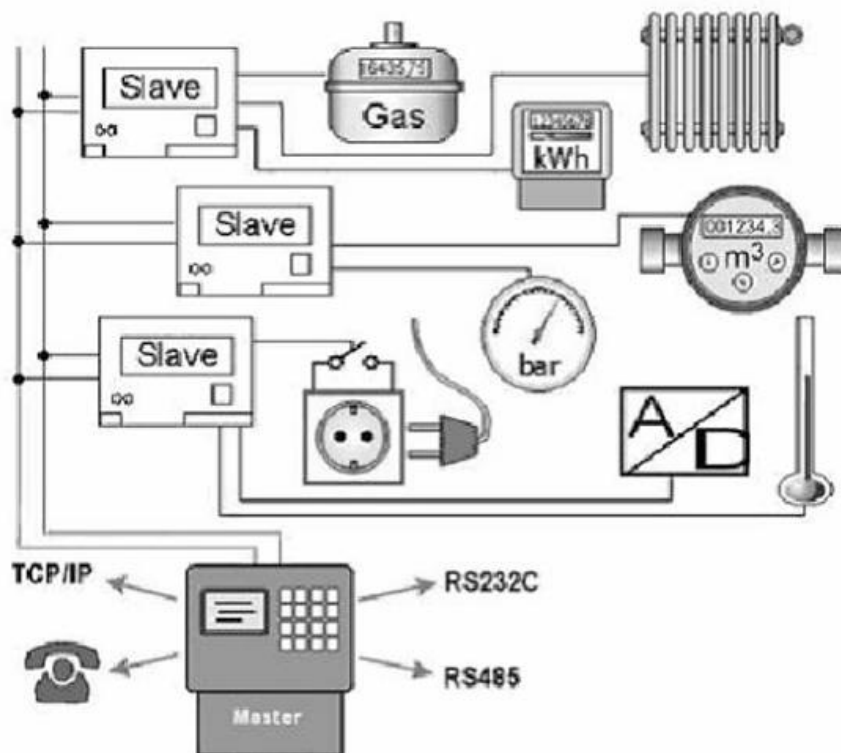


Рис. 4.5.6 Загальна схема мережі M-Bus

Для зчитування показників з подібних пристроїв потрібно використовувати перетворювачі (адаптери), які реалізують перехід з RS-232 на протокол M-Bus.

Існують прості схемні рішення, які дозволяють підключати 2–3 пристрої M-Bus безпосередньо до інтерфейсу RS-232, реалізуючи фізичний рівень обміну даними. Усі інші рівні — каналний, мережевий, прикладний — потребують програмної реалізації.

Альтернативним варіантом є створення Ethernet–RS232 переходу на базі плати, що забезпечить віртуальний COM-порт. Це дозволяє використовувати стандартне програмне забезпечення, що постачається разом із комерційними M-Bus–Ethernet адаптерами.

З огляду на низьку інтенсивність обміну даними, цілком достатньо задати швидкість передачі на рівні 400 бод, що відповідає можливостям TCP/IP-стека та Ethernet–RS232-модуля, реалізованого на основі вбудованого програмного забезпечення.

4.6 АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ВИРОЩУВАННЯ КУЛЬТУР У ВЕРТИКАЛЬНИХ ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ

4.6.1 Архітектура сучасної системи автоматизації тепличного комплексу

Сучасна автоматизована система управління технологічними процесами (АСУ ТП) у тепличному господарстві має відповідати вимогам модульності, масштабованості та відкритості інтерфейсів. Типова архітектура АСУ ТП включає три рівні:

Нижній рівень (рівень польового обладнання) — сенсори, виконавчі механізми, панелі керування, які здійснюють вимірювання фізичних параметрів, перетворення сигналів, а також реалізацію керувальних дій за командами контролерів.

Середній рівень (керувальний) — формується на основі програмованих логічних контролерів (ПЛК) з розподіленими модулями вводу/виводу, забезпечуючи збір даних і видачу команд на виконавчі пристрої.

Верхній рівень (диспетчерський) — включає сервери та робочі місця операторів (АРМ), на яких реалізується централізоване керування, візуалізація процесів та архівація даних, як правило, засобами SCADA-систем.

Вимоги до побудови АСУ ТП

Ключовою характеристикою системи є модульність, що дозволяє поділ управління на функціональні блоки. Кожен блок відповідає за керування певним технологічним вузлом або процесом та взаємодіє з іншими модулями через інтерфейси. Серед великої кількості сучасних рішень перевага надається шинним інтерфейсам, таким як CAN або PROFIBUS, які забезпечують високу надійність, простоту обслуговування та масштабованість системи.

У даній главі пропонується трирівнева модульна архітектура АСУ ТП для вертикального тепличного комплексу, що використовує CAN-шину як основний комунікаційний інтерфейс.

Переваги цієї архітектури:

- Повний охоплення технологічного процесу вирощування рослин;
- Можливість масштабування (додавання нових модулів без зміни існуючої системи);
- Гнучкість у налаштуванні;
- Сумісність із промисловими стандартами автоматизації;
- Підвищена надійність завдяки відмовостійкому шинному з'єднанню.

4.6.2 Існуючі рішення. У сучасних тепличних господарствах активно впроваджуються автоматизовані системи для контролю мікроклімату. Такі рішення здатні цілодобово відслідковувати параметри середовища – температуру, вологість повітря і ґрунту, рівень освітлення. У разі відхилення показників система автоматично вмикає виконавчі механізми для відновлення оптимальних умов.

Одним із ефективних рішень є система поливу, що поєднує крапельне зрошення з аерозольним розпиленням. Завдяки цьому досягається суттєве зменшення витрат води у порівнянні з ручним поливом.

Застосування інтелектуальних підходів на основі Інтернету речей дозволяє автоматизованим теплицям працювати ефективніше: економніше витрачати ресурси, адаптуватися до змін середовища, своєчасно реагувати на зміни параметрів.

Багато рішень реалізують керування на основі інформації з датчиків температури, вологості, освітленості. На основі зібраних даних система порівнює значення з наперед заданими порогами й виконує відповідні дії для стабілізації умов. Ефективними є алгоритми на базі нечіткої логіки, що дають змогу знизити витрати води при збереженні сприятливого мікроклімату.

Автоматизовані системи здатні підтримувати температуру, вологість і освітленість у заданих межах. Окремі варіанти також передбачають керування такими елементами, як вентиляційні отвори, двері, штори тощо – наприклад, за допомогою інфрачервоних сенсорів.

Деякі системи поєднують засоби прогнозування (наприклад, на основі нейронних мереж) із механізмами адаптивного регулювання, що дає змогу заздалегідь передбачити зміни клімату в теплиці та завчасно скоригувати параметри. Це дозволяє не лише підтримувати сприятливі умови для росту рослин, але й оптимізувати витрати енергії та води.

Ряд систем використовують хмарні сервіси для зберігання та моніторингу даних. Дані з датчиків можуть передаватися через Інтернет у реальному часі, з можливістю перегляду на мобільних пристроях або через браузер. Для оповіщення можуть застосовуватись SMS або push-повідомлення.

Разом із тим, деякі реалізації обмежуються лише моніторингом параметрів без можливості їх регулювання, що зменшує ефективність таких систем у порівнянні з повноцінною автоматизацією.

У сучасній практиці використовуються як централізовані системи з контролерами типу Arduino або Raspberry Pi, так і розподілені бездротові сенсорні мережі. Застосовуються також програмовані логічні контролери (ПЛК) для керування освітленням, температурою, вологістю та іншими технологічними параметрами. Зв'язок може здійснюватися як по дротовим інтерфейсам, так і по бездротових каналах.

Низка проектів демонструє часткове охоплення параметрів, однак у багатьох випадках відсутнє комплексне управління всіма процесами вирощування. Завданням подальших досліджень є інтеграція всіх критичних факторів у єдину керуючу систему, яка дозволить автоматизувати повний цикл вирощування в теплиці.

На сьогодні існує чимало систем автоматизованого керування параметрами мікроклімату в теплицях, однак більшість з них реалізує лише окремі функції технологічного процесу. Наприклад, поширеними є реалізації, що керують лише температурою та вологістю, використовуючи промислові контролери у поєднанні з сенсорами та виконавчими механізмами, підключеними через шину PROFIBUS або аналогічні інтерфейси. Такі системи зазвичай будуються за тривірневою ієрархічною структурою, проте не забезпечують комплексного управління усім циклом вирощування.

Інші реалізації орієнтовані на дистанційний моніторинг параметрів середовища. Для передавання даних з сенсорів можуть використовуватись бездротові модулі або мікроконтролери, що передають інформацію через GSM-GPRS-зв'язок. Такі рішення дозволяють оператору отримувати показники в реальному часі, але часто обмежуються лише зчитуванням значень без можливості їх регулювання.

Серед технологій, які демонструють високий потенціал у сфері автоматизації теплиць, варто виділити підходи на основі Інтернету речей. У подібних системах мікроконтролери керують роботою нагрівальних і охолоджувальних пристроїв, освітленням, системами поливу та вентиляції. Водночас, на практиці спостерігаються труднощі з точним регулюванням мікроклімату, особливо у вертикальних фермах. Це зумовлено конструктивними особливостями таких споруд, де мікрокліматичні умови можуть значно варіюватися в залежності від висоти або розташування.

Ще однією проблемою є використання дротових рішень у тепличних комплексах. Хоча вони забезпечують стабільну швидкість передачі даних, їх монтаж та обслуговування в умовах великої площі або багаторівневої структури значно ускладнюється. Це обмежує гнучкість систем і підвищує витрати на інфраструктуру.

Аналіз існуючих систем свідчить, що більшість з них розроблено з акцентом на часткову автоматизацію — зокрема, лише окремих параметрів або

етапів виробничого процесу. У багатьох випадках архітектура не передбачає масштабування або інтеграції додаткових функціональних блоків.

Водночас сучасні потреби сільськогосподарського виробництва, особливо в умовах вертикальних теплиць, вимагають відкритих, масштабованих та адаптивних систем управління. Необхідна архітектура, що забезпечує повноцінний контроль за усім технологічним процесом: від збору даних до управління кліматичними, поливними, освітлювальними та енергетичними системами.

Такі системи мають бути модульними, із підтримкою надійних комунікаційних інтерфейсів та протоколів зв'язку, що дозволяють легко об'єднувати різні модулі між собою та створювати гнучкі рішення під конкретні умови експлуатації.

Щоб задовольнити вимоги вертикальних тепличних господарств, доцільно зосередитися на розробці нових методів, моделей та архітектур, що реалізують адаптивне керування з урахуванням просторової нерівномірності кліматичних умов і складності самої конструкції теплиць. Це дозволить створити ефективні, самодостатні системи автоматизації наступного покоління — "розумні ферми", які здатні забезпечити стабільні врожаї за мінімальних витрат ресурсів.

З метою підвищення ефективності управління технологічними процесами у вертикальних теплицях пропонується розробити архітектуру автоматизованої системи керування, яка має відповідати таким ключовим вимогам:

- Масштабованість і модульність — кожен функціональний модуль повинен легко інтегруватися в систему, видалятися або замінюватися без впливу на роботу інших підсистем.
- Рівнева структура архітектури — необхідне чітке логічне розмежування між рівнями керування (фізичний, логічний, візуалізаційний) з мінімально можливою кількістю з'єднань між модулями, що реалізують фізичні процеси, алгоритми керування та обробку даних.
- Надійні інтерфейси зв'язку — міжмодульні інтерфейси мають забезпечувати високу швидкість і стабільність передачі даних відповідно до вимог технологічного процесу в умовах теплиці.

4.6.3 Приклад реалізації. У якості прикладного об'єкта автоматизації розглядається тепличний модуль вертикального типу для вирощування мікрозелені на основі технології аеропоніки низького тиску. Така установка передбачає наявність наступних інженерних систем:

- Система досвітлення — використання світлодіодних фітоламп з регульованою яскравістю, які доповнюють природне освітлення до оптимального рівня інсоляції.
- Система примусової вентиляції — набір припливних і витяжних вентиляторів, а також жалюзі з електроприводами.

- Кліматична установка — автономний контур подачі обробленого повітря, який включає в себе охолоджувач, нагрівач, зволожувач повітря та електроприводні заслінки.
- Система випарного охолодження та зволоження (СІОЗ) — насос високого тиску, підключений до водопроводу і форсунок, що створюють туман.
- Система поливу — контур з насосами низького тиску, що подає живильний розчин для рослин.
- Система затінення — приводи, які регулюють ступінь затемнення теплиці, обмежуючи надходження природного світла.

Автоматизована система керування для такої теплиці повинна реалізовувати:

1. Оперативний моніторинг і управління наступними параметрами середовища: температура та вологість повітря, рівень освітленості.

2. Управління інженерними системами (в автоматичному та ручному режимах) і моніторинг стану виконавчих пристроїв:

2.1. Кліматична установка:

- увімкнення/вимкнення охолоджувача повітря, контроль наявності води;
- увімкнення/вимкнення зволожувача повітря, контроль наявності води;
- регулювання швидкості обертання вентилятора кліматичного контуру;
- керування електроприводами заслінок (відсоток відкриття).

2.2. Система вентиляції:

- керування припливними вентиляторами (увімк./вимк., швидкість);
- керування витяжними вентиляторами (увімк./вимк., швидкість);
- керування положенням заслінок (відсоток відкриття).

2.3. Система випарного охолодження (СІОЗ):

- увімкнення/вимкнення насоса високого тиску;
- регулювання обертів двигуна;
- контроль тиску в системі;
- робота за заданими циклами.

2.4. Система досвітлення: керування фітолампами (увімк./вимк., регулювання яскравості, робота за розкладом).

2.5. Система поливу: керування насосом низького тиску (увімк./вимк., регулювання обертів, робота за циклами).

2.6. Система затінення: керування електроприводами затінення (відсоток відкриття).

4.6.4 Методи та інструменти

Виходячи з висунутих вимог до системи автоматизації, було обґрунтовано доцільність розробки модульної трирівневої архітектури.

На нижньому рівні системи розміщуються сенсори (температури, вологості, освітленості, рівня, тиску) та виконавчі пристрої (реле, аналого-цифрові задавачі, електроприводи тощо).

Модульний принцип реалізується на середньому рівні шляхом розподілу функціональності між окремими модулями, кожен з яких відповідає за керування окремим технологічним процесом (наприклад, системою поливу, освітленням, кліматом). Кожен модуль є автономним пристроєм, що забезпечує локальне керування своєю підсистемою.

Верхній рішень – SCADA система

З метою забезпечення сумісності з різними типами сенсорів (що можуть використовувати аналогові інтерфейси 4–20 мА, 0–10 В або цифрові інтерфейси I²C, SPI), між нижнім і середнім рівнями впроваджуються модулі введення-виведення. Вони зчитують значення з датчиків і передають їх далі за допомогою єдиного комунікаційного протоколу.

Ураховуючи, що деякі технологічні процеси мають спільні сенсори або перетинаються за параметрами керування, в якості проміжного інтерфейсу зв'язку між модулями середнього рівня було обрано CAN-шину. Такий підхід дає змогу зменшити кількість кабельних з'єднань, забезпечити високу надійність комунікації та забезпечити масштабованість системи.

Побудова системи проводиться за наступним алгоритмом:

- На основі вхідних технічних вимог формується архітектура трирівневої автоматизованої системи керування (АСУ).
- Визначається склад модулів на кожному рівні, встановлюються логічні зв'язки між ними.
- Аналізується доцільність та ефективність реалізації технологічних процесів на основі запропонованих апаратних та програмних рішень.

Як критерій оцінки використовується максимально допустимий час виконання операції або технологічного процесу.

4.6.5 Реалізація системи

Система автоматизації складається з трьох логічно взаємопов'язаних рівнів: нижнього, середнього та верхнього. Кожен із них виконує специфічні функції у процесі управління мікрокліматом у тепличному комплексі.

Нижній рівень. Нижній рівень включає засоби безпосередньої взаємодії з фізичними параметрами середовища. До нього належать:

Датчики: температури повітря, вологості повітря, рівня освітленості, тиску в системі водопостачання, рівня рідини в резервуарах, швидкості потоку води.

Виконавчі пристрої:

- електромагнітні реле для вмикання або вимикання обладнання з фіксованими режимами роботи;
- пристрої, що формують аналоговий сигнал (наприклад, від 0 до 10 вольт або від 4 до 20 міліампер) для управління обладнанням з плавним регулюванням (заслонки, приводи);

- пристрої широтно-імпульсної модуляції для управління швидкістю обертання вентиляторів, потужністю освітлення або подачею рідини насосами.

Для керування електроприводами, зокрема заслонками чи екранами, застосовуються модулі, які підтримують управління за аналоговим сигналом. На ринку існують сумісні модулі, здатні приймати сигнали різного типу — від 0 до 5 вольт, від 0 до 10 вольт або від 4 до 20 міліампер.

Безпосереднє керування електродвигунами змінного струму за допомогою широтно-імпульсного сигналу є технічно неможливим. Замість цього застосовуються частотні перетворювачі, які перетворюють такий сигнал на необхідну частоту обертання двигуна. Це є поширеною практикою в тепличних системах, і такі пристрої, як правило, не вказуються окремо на схемах, оскільки є невід'ємною частиною обладнання.

Середній рівень

Цей рівень відповідає за базову автоматизацію, яка забезпечує виконання операцій за заданим алгоритмом або в залежності від показників сенсорів. Також на цьому рівні здійснюється зв'язок із верхнім рівнем через спільну інформаційну шину. До складу входять такі функціональні модулі:

Модулі введення та виведення сигналів. Вони зчитують сигнали з підключених датчиків, перетворюють їх на уніфікований цифровий формат і передають до відповідних керуючих модулів. Також вони приймають сигнали керування і перетворюють їх у формат, придатний для виконавчих пристроїв.

Модуль керування кліматом. Він контролює температуру та вологість повітря, визначає режим роботи охолоджувача, зволожувача, вентиляторів, заслонок. Також він забезпечує захист устаткування від перегріву або сухого ходу в разі відсутності води і взаємодіє з модулем, що відповідає за розпилення води або підвищення вологості, для синхронізації роботи.

Модуль керування вентиляцією. Він відповідає за зміну інтенсивності припливу та витяжки повітря та регулює швидкість обертання вентиляторів і ступінь відкриття заслонок.

Модуль управління системою зволоження повітря та охолодження за рахунок розпилення води. Він забезпечує керування насосом високого тиску та контролює тиск у магістралі. Модуль також формує сигнали для зміни частоти обертання двигуна в залежності від поточних умов.

Система автоматизації тепличного комплексу передбачає гнучке управління підсистемами досвітки, зашторювання, поливу, а також включає центральний логічний модуль і верхній рівень керування, що забезпечує взаємодію з користувачем.

Керування досвіткою здійснюється за допомогою спеціального функціонального модуля, що відповідає за штучне освітлення в окремих зонах теплиці, а також за регулювання зашторювання у разі потреби. До його завдань входить зміна уставок і гістерезисів, налаштування режимів роботи світлодіодних ламп — таких як імітація дня й ночі або поступових світанків і

заходів. Модуль постійно отримує дані з датчиків освітленості й формує сигнали керування яскравістю для окремих груп ламп за допомогою широтно-імпульсної модуляції. При потребі він обмінюється інформацією з модулем, який керує системою зашторювання, для комплексного регулювання надходження світла.

Модуль керування зашторюванням відповідає за регулювання ступеня відкриття чи закриття штор у теплиці. Він тісно пов'язаний із блоками керування кліматом та досвіткою, реагує на команди цих систем і забезпечує точне регулювання положення приводів відповідно до поточних умов освітлення та температури.

Керування поливом реалізується окремим модулем, який підтримує різні режими зрошення, зокрема полив за заданими циклами або з урахуванням поточної потреби рослин. Цей модуль керує включенням або вимкненням насосів, а також швидкістю їх обертання, що задається за допомогою широтно-імпульсного сигналу.

Центральну роль у середньому рівні відіграє модуль логіки і збору даних, що виступає проміжною ланкою між технологічними модулями і верхнім рівнем системи. Він приймає дані з усіх пристроїв, підключених до інформаційної шини, обробляє їх, веде журнал подій, надсилає команди на зміну режимів роботи блоків керування і виконує автоматичну діагностику. Крім того, передбачено спеціальний сервісний інтерфейс для ручного доступу до діагностики й налаштування пристроїв середнього та нижнього рівнів.

Верхній рівень системи орієнтований на взаємодію з користувачем і здійснює високорівневе управління технологічним процесом. На персональному комп'ютері розміщується сервер, який приймає й агрегує дані від модуля логіки, забезпечує графічний інтерфейс користувача для моніторингу стану об'єкта, а також для внесення змін у режими роботи системи. Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивне керування виробничим процесом у теплиці — алгоритми управління можуть змінювати свої параметри залежно від динаміки внутрішніх і зовнішніх умов, що дає змогу підвищити ефективність і стабільність функціонування тепличного комплексу.

4.6.6 Отриманий результат.

Запропонована архітектура автоматизованої системи управління технологічними процесами для використання в вертикальних гідропонних і аеропонних тепличних фермах передбачає поділ на три логічні рівні. На нижньому рівні розміщені сенсори та виконавчі пристрої, які безпосередньо вимірюють і впливають на параметри середовища. Проміжний рівень забезпечує обробку сигналів, збір даних і безпосереднє управління — на цьому етапі функціонують модулі введення/виведення, блоки керування окремими підсистемами, а також логічний модуль збереження і передачі інформації. Верхній рівень реалізується у вигляді локального сервера, що відповідає за централізоване спостереження, моніторинг і взаємодію з користувачем через графічний інтерфейс.

Відмінністю цієї архітектури є її здатність управляти повним набором параметрів технологічного процесу, що рідко реалізується у більшості раніше запропонованих систем. Крім того, система має гнучку структуру, що дозволяє легко розширювати її функціональні можливості шляхом додавання нових модулів без необхідності зміни основної структури. Такий підхід забезпечується модульністю та розмежуванням функцій на рівнях, що відкриває можливість інтеграції з хмарними сервісами та дистанційного керування процесами — перевага, яка не підтримується у низці інших рішень.

Використання багаторівневої побудови та шини передачі даних дозволяє мінімізувати кількість фізичних з'єднань між елементами системи. Це, своєю чергою, знижує витрати на монтаж і обслуговування, спрощує розгортання системи у складних умовах, таких як багаторівневі теплиці.

Щоб підтвердити ефективність запропонованої архітектури, необхідно оцінити відповідність швидкості виконання усіх операцій вимогам конкретних технологічних процесів. Наприклад, якщо виникає аварійна ситуація, пов'язана з перевищенням тиску в контурі системи зрошення високого тиску, необхідно негайно зупинити насос. Цей сценарій включає декілька етапів: спочатку модуль зчитування фіксує тиск і передає дані до керувального блоку та до логічного модуля збору даних; далі система приймає рішення про зупинку; формується і надсилається команда на відключення насоса; виконується фізична зупинка агрегата; надсилається підтвердження виконання операції.

Враховуючи швидкість передачі даних по шині, довжина якої не перевищує 250 метрів, і обрану архітектуру, весь цикл передачі даних та виконання фізичної дії займає не більше однієї секунди. Це означає, що система здатна реагувати в межах допустимого технологічного часу. Крім того, затримки при передачі даних на рівні користувацького інтерфейсу також не перевищують критичного значення, що забезпечує надійний контроль і керування технологіями з боку адміністратора.

Загалом така архітектура забезпечує необхідну швидкодію, надійність, розширюваність і адаптивність системи управління, що робить її придатною для сучасного автоматизованого вирощування культур у вертикальних тепличних фермах.

Рекомендована література (теплиці)

- *Meng Guo, Zhi Jin, Li Ma, Siying Ou (2025) "Application of plant factory with artificial lighting in horticultural production: current progress and future trends", Horticultural Plant Journal, <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2025.04.005>.*
- *Fatima Ezzahra Allali, Hicham Fatnassi, Hassan Demrati, Reda Errais, Ahmed Wifaya, Ahmed Aharoune (2025) "Greenhouse cooling systems: A systematic review of research trends, challenges, and recommendations for improving sustainability", Cleaner Engineering and Technology, Vol. 26, 100973, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100973>.*

- Jingxin Yu, Jiang Liu, Congcong Sun, Jiaqi Wang, Jianchao Ci, Jing Jin, Ni Ren, Wengang Zheng, Xiaoming Wei (2025) "Sensing technology for greenhouse tomato production: A systematic review", *Smart Agricultural Technology*, Vol. 11, 101020, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101020>.
- Narjiss Seddaoui, Fabiana Arduin (2025) "Recent advances in wearable and implantable electrochemical (bio)sensors for plant health monitoring", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 191, 118336, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118336>.
- Priya, P. K., Reethika, A., Vijaykumar, G., & Koresh, H. J. D. (2025). Robotics-assisted precision and sustainable irrigation, harvesting, and fertilizing processes. In S. Singh, V. Sood, A. L. Srivastav, & Y. Ampatzidis (Eds.), *Hyperautomation in Precision Agriculture* (pp. 217–226). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24139-0.00018-7>
- Shabir, S., & Hamadani, H. (2024). Advances in robotics for biological sciences. In A. Hamadani, N. A. Ganai, H. Hamadani, & J. Bashir (Eds.), *A Biologist's Guide to Artificial Intelligence* (pp. 255–268). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24001-0.00015-4>
- Gorjian, S., Minaei, S., MalehMirchegini, L., Trommsdorff, M., & Shamshiri, R. R. (2020). Applications of solar PV systems in agricultural automation and robotics. In S. Gorjian & A. Shukla (Eds.), *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (pp. 191–235). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00007-7>
- Raheem, D., Treiblmaier, H., Mohammed, W. M., Ramis Ferrer, B., & Martinez-Lastra, J. L. (2024). Robotics as key enabler technology in Food Industry 4.0 and beyond. In A. Hassoun (Ed.), *Developments in Food Quality and Safety: Food Industry 4.0* (pp. 121–131). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15516-1.00007-4>
- Hughes, J., Lida, F., & Birrell, S. A. (2022). Field robotics for harvesting: A review of field robotics approaches for harvesting. In T. Mottram (Ed.), *Digital Agritechology* (pp. 69–94). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817634-4.00009-4>
- Енергоефективне управління виробництвом в тепличних комбінатах продукції заданої якості: монографія / Лисенко Віталій Пулипович [та ін.]. - Київ : Ямчинський О. В. [вид.], 2021. - 379 с.
- Проектування систем автоматизації для АПК: [підручник] / В. П. Лисенко [та ін.]. - Київ : Ямчинський О. В. [вид.], 2022. - 626 с.

Питання для самоперевірки (теплиці)

- Які фактори роблять рослинні фабрики перспективними для інтенсивного садівництва?
- Які основні типи штучного освітлення застосовуються у фабриках рослин?
- У чому полягають ключові переваги і недоліки використання LED-освітлення?
- Які перспективи розвитку технологій рослинних фабрик очікуються у найближчі роки?

- Які основні методи охолодження теплиць застосовуються у світі?
- Чому охолодження теплиць є критично важливим завданням у спекотному кліматі?
- Які виклики пов'язані з високим енергоспоживанням систем охолодження?
- Які підходи дозволяють зробити системи охолодження більш енергоефективними та сталими?
- Які параметри вирощування томатів найчастіше контролюються за допомогою сенсорів?
- Які типи сенсорів застосовуються у сучасних теплицях для контролю мікроклімату?
- У чому полягають переваги використання сенсорних систем над традиційними методами моніторингу?
- Які обмеження та проблеми залишаються у впровадженні сенсорних технологій у тепличному виробництві?
- Які принципи роботи лежать в основі електрохімічних біосенсорів для рослин?
- Які параметри стану рослин можна відслідковувати за допомогою імплантованих сенсорів?
- У чому перевага носимих біосенсорів порівняно з дистанційними методами моніторингу?
- Які наукові виклики залишаються у розробці стабільних і довготривалих біосенсорів для агросфери?
- Які основні компоненти входять до складу інформаційно-вимірювальної системи теплиці?
- Які параметри мікроклімату найбільш критичні для контролю при вирощуванні культур?
- Як інтеграція IoT-рішень впливає на ефективність моніторингу теплиць?
- Які програмні засоби зазвичай застосовуються для візуалізації та аналізу даних із сенсорних мереж?
- Які технології автоматизації дозволяють підтримувати оптимальні умови у вертикальних фермах?
- Як системи управління живленням (fertigation) інтегруються в автоматизовані комплекси?
- Які алгоритми найчастіше застосовуються для оптимізації параметрів вирощування?
- Які переваги та обмеження має повна автоматизація вертикальних тепличних господарств?