

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти
магістр

на тему: «Розробка пристрою для контролю вироблення газів побічними
продуктами тваринництва»

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
ступеня вищої освіти магістр
групи 133ГМмд_22
КАКУН Юрій
Керівник: докт. техн. наук, доцент
ВЕТОХІН Володимир

Полтава – 2023 року

ВСТУП

Метою цього дослідження була розробка газової вимірювальної камери для порівняння викидів із різних сховищ молочного гною. Корівники з компостним камерами (ККК) – це система вільного утримання, в якій корови знаходяться на компостній камері з інтенсивним контролем. Тирса є основним матеріалом, який додається до системи разом із гноєм і сечею корів, і камеру перемішують один-два рази на день.

Підтримання високого рівня аеробної мікробної активності в камері має вирішальне значення для здоров'я корів. Попередня робота з викидів молочних продуктів не включала компостні камери; очікувалося, що переважно аеробний оброблений шар системи матиме інший профіль викидів, ніж інші системи зберігання гною. Вимірювальна камера була розроблена для визначення потоків викидів з поверхні компостної грядки. Інфрачервоні та електрохімічні датчики, що вимірюють аміак, метан і вуглекислий газ, щосекунди отримують дані про концентрацію газу, температуру та вологість. Відносно нижча вартість кожної камери, порівняно з фотоакустичними та газовими хроматографічними системами, дозволить використовувати більшу кількість камер для більш точного представлення просторових змін у системі.

2021 року викиди парникових газів в Україні склали 341,5 млн. еквівалент-тон CO_2 . Ця величина на 62,5% менше від аналогічної за 1990 рік, але перевищує на 7,5% показник 2020 року [1]. Кілька атрибутів ККК показують потенціал для сприяння зменшенню викидів парникових газів (ПГ), і дослідження цьому напрямку можуть надати фермерам додаткову інформацію під час прийняття рішень щодо утримання молочної худоби.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ЩО СТОСУЮТЬСЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОРІВНИКІВ З КОМПОСТНИМИ КАМЕРАМИ

1.1. Корівники з компостними камерами

Корівники з компостними камерами є відносно новим [2], але все більш популярним варіантом утримання молочної худоби, що пропонує потенційні переваги в комфорті корів порівняно з системами вільного утримання. Польові дослідження з молочним компостом показали деякі переваги внесення на сільськогосподарські ґрунти. [3] не виявили викидів NH_3 після розкидання компостованого молочного гною, у порівнянні зі штабельним гноем, у якому більшість викидів NH_3 відбулася після розкидання. [4] виявили, що компост із ККК забезпечує більше доступного для рослин фосфору, ніж свіжий гній, і має такі ж характеристики розкладання, як свіжий гній. Проте все ще існує потреба в оцінці викидів парникових газів (ПГ) від добре керованих систем ККК.

Фермери розробили комори з компостною підстилкою здебільшого заради комфорту корів. Під час обсерваційного дослідження 42 ферм із ККК фермери повідомили, що їхні корови в період лактації зменшили кульгавість, зменшилася кількість соматичних клітин 2 і зменшилася кількість відкритих днів. Економічно спорудити ККК дешевше, ніж інші варіанти, але вони включають постійне введення більшої кількості підстилаючого шару, що призводить до більш змінних річних витрат [2]. Успіх ККК залежить від управління самою камерою; компостування залежить від активності бактерій і грибів, які переробляють сировину, причому гриби становлять найбільшу частку мікробної біомаси. Взаємодія між найбільш основними змінними залежить від роботи бактерій та вмісту вільної та зв'язаної води.

Найголовнішою змінною є вміст вологи (ВВ), оскільки він безпосередньо впливає на ризик маститу та може бути швидко змінений виробником; Температура компосту, яка часто використовується для оцінювання успіху компостування, є змінною, що відстає. Зміна температури компосту слідує за іншими змінами всередині камери, тому моніторинг, насамперед ВВ, повинен допомогти виробникам швидше виявити проблеми, ніж температура, дозволяючи їм змінювати стратегії управління до того, як продуктивність камери суттєво знизиться.

Вміст води має двосторонню взаємодію зі швидкістю висихання. По-перше, з основних принципів масообміну очевидно, що підвищена швидкість сушіння зменшить ВВ, якщо не діють інші фактори. Однак важливо зазначити, що ВВ також впливає на швидкість висихання.

При висиханні пористих систем відбуваються два процеси [5]. Перший – передача енергії з навколишнього середовища у вигляді тепла; цей процес є функцією зовнішніх умов, особливо температури, відносної вологості, потоку повітря, площі поверхні та тиску. Це особливо важливо для незв’язаної поверхневої води. Другий процес – це масопередача, коли внутрішня вода переміщується до твердої поверхні, і тоді процес теплопередачі домінує над цими частинками води. Рух води до поверхні в основному залежить від внутрішніх умов, особливо фізичної природи твердої речовини, температури та ВВ.

Два процеси та їхню взаємодію можна побачити, побудувавши графік залежності швидкості висихання від ВВ системи, що спостерігається. Існують три основних етапи [5]. По-перше, існує постійна швидкість висихання, поки поверхня має вільну воду; стадією регулювання швидкості є дифузія водяної пари через межу повітря-вода та швидкість видалення поверхні дифузії. Близьче до кінця цієї стадії вода транспортується з-середини твердого тіла за допомогою капілярних сил, хоча швидкість може бути постійною; тоді середній ВВ досягає критичного ВВ, після чого поверхнева плівка видаляється настільки, що на поверхні з’являються сухі плями. Друга стадія - це перший період зниження швидкості, під час якого ненасичена поверхня висихає до повного випаровування поверхні. Третя стадія - це другий період падіння, в якому керуючим кроком є швидкість, з якою вода може просуватися через тверду речовину в результаті градієнтів концентрації від внутрішньої до зовнішньої поверхні. У роботі [6] з компостним біофільтром спостерігався різкий перехід до критичної точки між 39-43% ВВ (вода основа).

Тоді вміст води в агрегаті може мати вирішальний вплив на присутність організмів. Змішані аноксичні зони потенційно сприяють внутрішній денітрифікації. [6] також досліджували утворення та видалення мікробного газу протягом усього процесу сушіння. Біологічні перетворення азоту в нітрифікуючих компостних біофільтрах зазнавали впливу води так само, як і ґрунти. Вироблення

метану почалося на початку спадної швидкості сушіння, досягло піку під час спадної швидкості сушіння, коли утворення N_2O припинилося, і припинилося на стадії стабільно-сухої системи.

Частково ця характеристика може бути зумовлена не лише метанотрофною активністю, але й окислювачами NH_3 , що окислюють CH_4 [7]. Умови вологості середовища потенційно впливають на видалення та долю забруднень у нітрифікуючих газофазних компостних біофільтрах [6]. Таким чином, будь-які емпіричні спостереження компостної системи повинні супроводжуватися вимірюваннями ВВ, щоб бути корисними.

[8] комбіновані рівняння тепло- та масопереносу для отримання моделі для параметрів, включаючи час сушіння та розташування фронту сушіння в пташиному посліді. Модель оцінювала сфери та циліндри з урахуванням багатьох відомих параметрів середовища та частинок, включаючи емпіричний коефіцієнт. Віллїтс вважав систему сухою при рівноважній вологості. Рівняння легко як вирішити, так і змодельовати в математичному програмному забезпеченні. [9] змодельовали розподіл кисню в поперечному перерізі частинки контурними кривими; подібний, але більш графічно вдосконалений підхід можна застосувати до руху фронту сушіння.

Вміст вологи є фактором, що сприяє утворенню заповненого водою порового простору (ЗВПП); при вищому ВВ простір пор, швидше за все, буде зайнято водою, ніж повітрям, що впливає на активність мікробів. Хоча вода необхідна як засіб транспортування, ЗВПП більше ніж на 60% збільшує активність мікробів, здатних використовувати альтернативні акцептори електронів, такі як анаеробні денітрифікатори [10]. Надмірно високий ВВ може сприяти відбору більшої кількості анаеробних мікробів; аеробний метаболізм, як правило, більш ефективний у розщепленні матеріалу та призводить до кращого утворення тепла. [11] запропонували тримати ВВ нижче 65% у ККК; це пізніше було посилено [12] з рекомендованим оптимальним діапазоном ВВ 45-55%.

На додаток до простого ВВ, агрегатна структура має значний вплив на рух води і, таким чином, на висихання ґрунту, і цей принцип також застосовний у компостних системах. Навіть у загалом добре аерованій системі всередині агрегатів

можуть існувати анаеробні мікроцентри, залежні від розміру внутрішньоагрегатних пор. Мікропори будуть більш схильні обмежувати рух води через дію капілярних сил. Чи відбудеться капілярний потік назовні, залежить від різниці відносного притягання між молекулами рідини-рідина та молекулами рідини-тверде тіло. Рідина також утримується щільніше при нижчому ВВ у пористих твердих тілах [13].

Загалом, неоднорідність компостного середовища робить можливим одночасне протікання аеробних і анаеробних процесів, що призводить до варіацій у виробленні газу, які будуть більш детально описані в наступному розділі.

Організми виробляють тепло в результаті обмінних процесів. Це тепло призводить до підвищення температури компосту, що, у свою чергу, може стимулювати швидкість метаболізму; такі температурні зміни виражаються як Q_{10} [14]. Крім того, зміни температури, викликані мікробами, можуть призвести до тиску селекції на мікробну популяцію через зміну температурних переваг; тепліше середовище буде обрано для термофілів, тоді як холодніше середовище буде обрано для психрофілів, хоча поверхневий шар компосту зазвичай знаходиться в межах мезофільного діапазону температур. Система ККК визначається як «напівкомпостування», оскільки вона не досягає температур, достатніх для санітарної обробки матеріалу [15]. Оскільки для підтримки популяції аеробних мікробів необхідне перемішування, важливо, щоб виробники постійно перемішували камеру протягом року, незважаючи на передбачуваний ризик зниження температури камери через введення холодного повітря взимку. Між температурою компосту та швидкістю сушіння також існує двосторонній зв'язок, оскільки сушіння збільшує охолодження шляхом випаровування (зниження температури камери), тоді як вища температура компосту збільшує швидкість сушіння. Рис. 1 показує вплив кліматичних умов на загальний процес компостування у ККК.

На малюнку 1-2 показано, як погода впливає на основні процеси компостування через зміни вологості, опадів і температури. Опади можуть безпосередньо додавати вологу до камери, особливо впливаючи на краї, якщо завіси чи інші фізичні бар'єри не перешкоджають її просуванню в корівник.

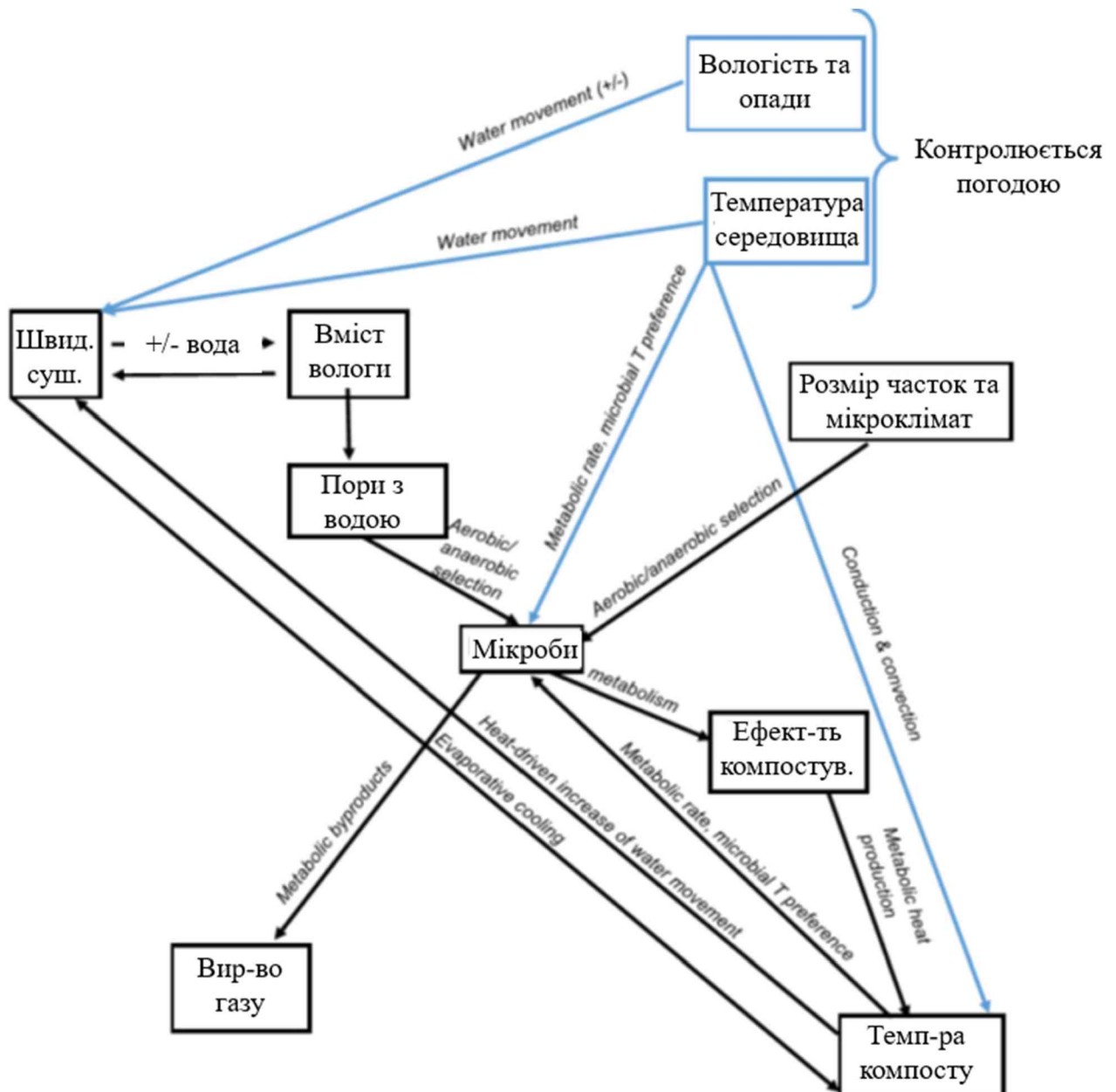


Рисунок 1. Вплив погоди на загальний процес компостування в ККК.

Вологість впливає на швидкість сушіння, оскільки вона визначає здатність повітря вбирати вологу; при вищій вологості можна очікувати нижчі швидкості висихання, тоді як навпаки при нижчій вологості можна очікувати схожих температур. Температура навколишнього середовища також впливає на швидкість висихання, тому що тепліше повітря, як правило, може містити більше води, ніж холодніше повітря за 100% відносної вологості. На активність мікроорганізмів впливає не лише тиск відбору, який застосовує температура навколишнього середовища, але й зміна швидкості метаболізму в процесі, ідентичному тому, який раніше обговорювався з температурою компосту. Крім того, температура навколишнього середовища впливає на температуру компосту через провідність і

конвекцію, на додаток до опосередкованого впливу на швидкість висихання. [15] описав ефект випаровування переохолодження пачки взимку, але не влітку; [16] помітили, що коливання температури компосту слідували за коливаннями температури навколишнього середовища протягом року. Хоча це прямо не зображено, взаємодія всіх трьох основних факторів контролю погоди (опадів, вологість і температура) повинна бути рушійною силою для контролю виробника. Виробники в кінцевому підсумку контролюють вентиляцію, аерацію камери, додавання добрив та кількість корів (рис. 2).

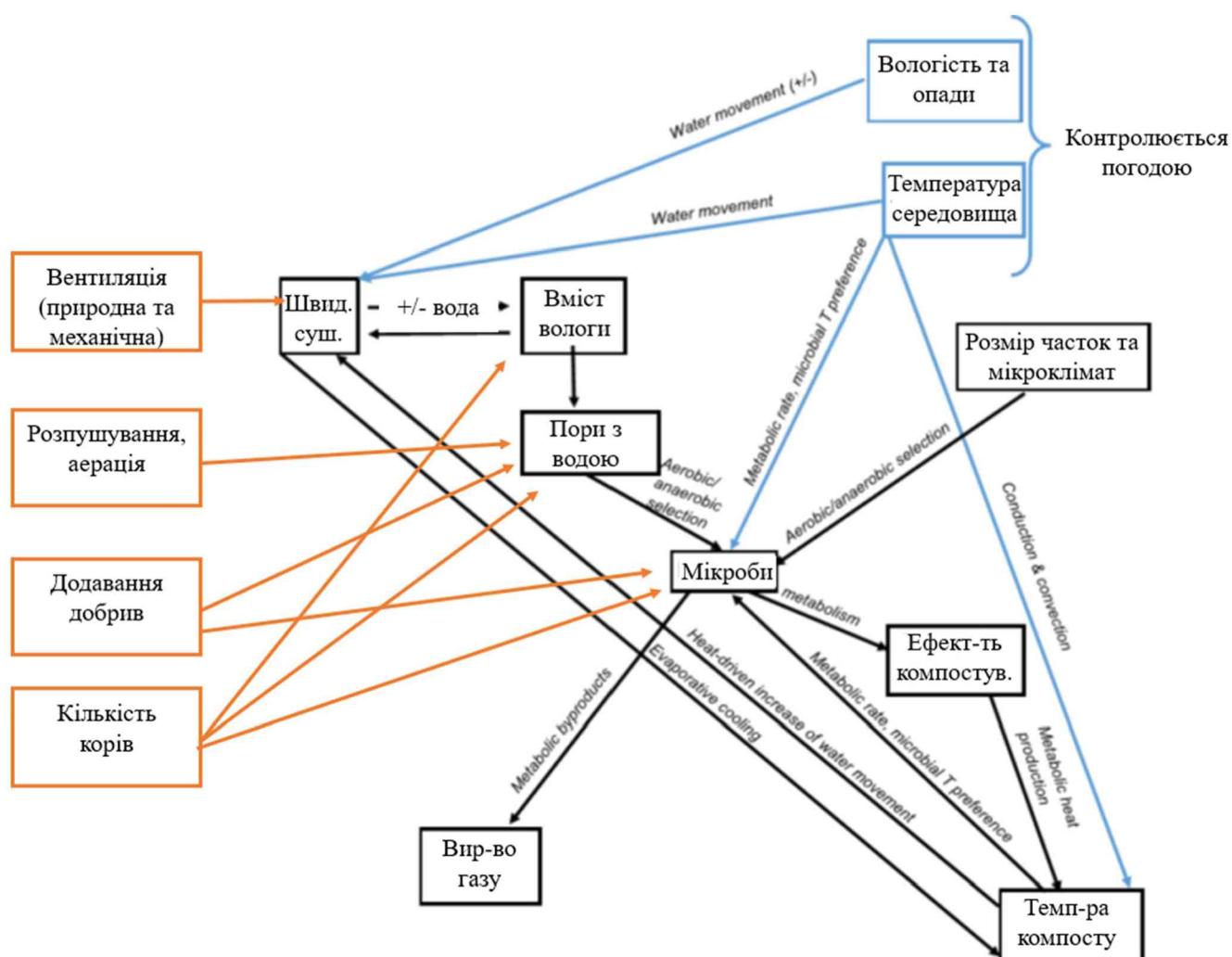


Рисунок 2. Взаємодія засобів контролю погоди та контролю виробника з середовищем компостування в ККК.

[12] описали короткострокові та довгострокові фактори, що впливають на компостне ложе, з короткостроковими факторами, що впливають на корівник протягом кількох днів або тижнів, включаючи погоду, щільність посадки, доступ до пасовища, підстлаючий шар та стратегію перемішування; довгострокові фактори

включають структуру корівника, рух повітря, завіси та знання менеджера. Ці раніше описані фактори в основному добре вписуються в діаграму на малюнку 3.

Вентиляція необхідна в будь-якій системі утримання тварин і є особливо важливою для охолодження корів, оскільки коефіцієнт температури та вологості (ТВК), що перевищує термонеїтральну зону корови, призводить до втрат продуктивності. Вологе середовище, таке як Полтава, вимагає ще більшої уваги до руху повітря на рівні корови; [17] зазначив, що негативні наслідки, спричинені підвищеною вологістю, можна пом'якшити, підтримуючи швидкість повітря від 1,5 до 2 м/с. У корівнику ККК вентиляція особливо важлива, оскільки вона не тільки безпосередньо впливає на корів, але й необхідна для сушіння камери; більш висока швидкість руху повітря призводить до вищої швидкості висихання. Вентиляція може бути як природною, так і механічною, при цьому найбільш ефективним є їх поєднання.

Таким чином, успішне провітрювання відбувається в першу чергу при правильному проектуванні корівника. Камери повинні бути розташовані на достатній відстані одна від одної, щоб не перешкоджати руху повітря, тому що якщо цього не зробити, швидкість повітря не тільки зменшиться, але повітря також стане більш зволеним, коли воно проходить через корівник, таким чином, стане менш ефективним для сушіння наступних камер. [18] надають вказівки щодо відповідних отворів у бічних стінках і вентиляційних отворів у коньках для забезпечення природної вентиляції, а також обговорюють типи та вибір вентиляторів.

Розпушування корівнику — це стратегія управління, яка найбільше відрізняється від стратегії, що застосовується до звичайного корівника з підстилаючим шаром. Розпушування зазвичай відбувається двічі на день, причому час доїння забезпечує зручний час, протягом якого корови назовні корівнику. Він служить для збільшення простору пор і руйнування агрегатів і є критичним, оскільки аеробні мікроби постійно споживають доступний кисень. Крім того, ця дія сприяє більш ретельному перемішуванню доданих матеріалів у упаковку та зменшує ущільнення, спричинене щоденним рухом корів. На додаток до підтримки загального аеробного середовища для активного компостування, це призводить до сухої, пухнастої поверхні, на якій корови можуть лежати.

Додавання підстилки впливає на корівник двома способами. Перший – шляхом зміни ЗВПП; різні фізичні властивості матеріалів призводять до різного ступеня впливу підстилки на ЗВПП. Другий – через доступність поживних речовин для мікробів. ККК має підтримувати співвідношення В/А приблизно від 25:1 до 30:1 [18]. Підстилка додається для збільшення співвідношення В/А, але навіть матеріали з подібним співвідношенням В/А можуть метаболізуватися по-різному; [19] припускають, що високий рівень лігніну в продуктах з деревини, їхнє велике співвідношення площі поверхні до об'єму та мінімальне ущільнення між перемішуваннями можуть бути причинами спостережуваного успіху виробів з тонкої сухої деревини. [20] спостерігали схожу ефективність упаковки для різних матеріалів, включаючи тирсу, лляну солому, деревну стружку, лушпиння вівса, соєву солому та «солом'яний пил». Температури корівника вказували на те, що всі матеріали підтримували мікробну активність і виробляли тепло, навіть із подібними хімічними характеристиками до сараїв з тирсою. Однак вони відзначили, що більшість виробників домішували тирсу навіть при використанні альтернативних матеріалів; можливо, що тирса забезпечує найменший об'єм матеріалу для найвищого співвідношення В/А, фактор особливого занепокоєння для ферм з обмеженим простором для зберігання підстилок.

Успіх також був помічений у корівниках з компостною камерою, які не використовують додатковий матеріал для підстилки. Було проведено спостереження за трьома фермами з ККК в Ізраїлі та виміряно викиди NH_3 . Дослідження показало, що викиди NH_3 у десять разів нижчі з камери компосту порівняно з вискобленою кормовою алеєю. Дослідники припустили, що ця різниця, можливо, пов'язана з високим співвідношенням В/А і азотзв'язуючими бактеріями в компості [21]. Це важливий результат, оскільки вплив дієти усувається, оскільки обидва типи гною походять від одних і тих же корів; це також демонструє, що те, чим застелений корівник, може бути не таким важливим, як підтримання належних умов вологості та співвідношення В/А для підтримки оптимальної популяції мікроорганізмів компостування.

Мабуть, найбільш очевидним контролем виробника є самі корови, оскільки вони вносять майже всю вологу та більшість поживних речовин у систему. Більший

простір на одну корову дає змогу камері триматися довше між додаванням підстилки, оскільки матеріал займає більше часу, щоб досягти своєї водоутримуючої здатності. Для голштинської породи слід забезпечити 9,3 м² місця для відпочинку на корову, а для джерсійської породи – 7,9 м² для відпочинку на корову, причому збільшення простору також необхідне для високопродуктивних корів через більшу вироблення вологи [18]. Щільність поголів'я безпосередньо впливає на вміст вологи, і корови знижують ЗВПП шляхом ущільнення матеріалу, коли вони рухаються та лежать на камері.

Вони також безпосередньо сприяють мікробній біомасі, крім того, що постачають майже весь азот для мікробних перетворень. [22] зазначили, що кількість стрептококових бактерій зменшилась із вищою внутрішньою температурою компосту та негативно корелювала з щільністю посадки, а також із співвідношенням В/А, припускаючи, що керування зграєю для зниження ВВ та підвищення температури може обмежити ріст стрептококів.

Метою управління будь-яким молочним підприємством (включаючи ККК) є оптимізація середовища утримання корів для досягнення максимальної прибутковості. Вже згадувалося про важливість вентиляції для охолодження корів; однак сам корівник має вплив на корів, значною мірою залежно від ВВ корівнику. Вищий ВВ збільшує легкість, з якою матеріал прилипає до корів; в решті-решт, контроль за зниженням ВВ покращує гігієну корів [15]. [16] виявили, що гігієна ККК залишається нижче 3 балів (суцільні бляшки бруду з видимим волоссям), використовуючи як ВВ, так і температуру в корівнику як критерії. Занепокоєння ранніх університетських дослідників і фермерів полягає в очікуванні більшої концентрації патогенів, що викликають мастит, у такому, здавалося б, брудному середовищі, як ККК. Опитування ферм, проведене [15] показали, що ВВ і площа на корову впливають на концентрацію збудників маститу. Вищий ВВ дозволяв більше матеріалу прилипати до корів; догляд за сухою поверхнею для відпочинку може допомогти запобігти збільшенню ПКК і маститу.

Незважаючи на високу концентрацію бактерій у корівнику, стада, які перейшли з систем вільного утримання в Полтаві, мали численні покращення продуктивності, ймовірно, завдяки підвищенню комфорту корів, що забезпечується

ККК. «Комфорт корови» — це термін, якого дослідники час від часу уникають, оскільки його неможливо виміряти безпосередньо; однак покращення комфорту корів може проявлятися в інших областях, які можна спостерігати. Кульгавість є особливо критичною проблемою в молочній промисловості через економічні та суспільні проблеми. [24] в огляді досліджень кульгавості відзначили загальне скорочення часу прийому їжі зі збільшенням кульгавості; Хоча взаємодія складна, зазвичай кульгава корова відчуває втрати продуктивності протягом лактації від 270 до 574 кг. Поліпшення комфорту корів було найбільшою перевагою, яку називали виробники, які переходили на ККК [15]. Зниження ПКР навіть при вищій концентрації патогенних бактерій у підстилці вказує на імунологічну користь від покращеного комфорту для корів, і контрастує з попередніми очікуваннями, які базувалися на традиційній підстилці компостної камери.

Вміст вологи є головним фактором, що викликає занепокоєння при в управлінні корівниками з компостною камерою. Однак важливо розуміти, що зв'язки між факторами середовища корівників створюють «павутину» взаємозв'язків, а не простий лінійний процес; окремі компоненти не можуть бути розділені. Виробники повинні керувати декількома змінними, щоб оптимізувати середовище корів для підвищення продуктивності. Хоча щоденні витрати на підстилаючий шар вищі порівняно з традиційними методами утримання, початкові інвестиції в корівники нижчі; крім того, підвищення комфорту корови, що призводить до більшої продуктивності молока та нижчого ПКР, може забезпечити економічну вигоду. Унікальний стиль управління має призвести до іншого профілю викидів парникових газів, ніж у звичайних системах розміщення та зберігання гною.

1.2. Викиди молочної промисловості

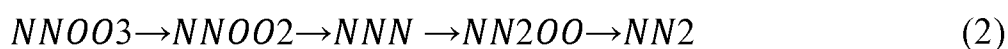
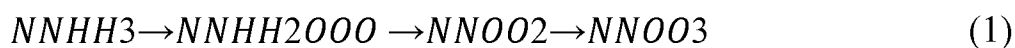
Жуйні є важливою складовою глобальної продовольчої безпеки, оскільки вони можуть переробляти неїстівну їжу, що є важливою перевагою, яку слід враховувати при порівнянні ефективності між видами. Подібним чином майбутні регулятивні рішення повинні збалансувати продовольчу безпеку та зміну клімату, що часто є конкуруючими викликами [24]. З цією метою з 1,23 кг CO₂e на кг молока з корекцією жиру (МКЖ) у споживаному рідкому молоці 72% пов'язані з факторами

на фермі [25]. Молочна промисловість провідних країн світу працює над покращенням екологічних показників ланцюга постачання таким чином, щоб це було економічно стійким.

Проблема прямого обмеження викидів полягає в тому, що витрати та зусилля, спрямовані на це, певною мірою відволікаються від фактичного виробництва. Витрати на регулювання парникових газів молочної продукції сильно відрізняються між регіонами; загалом, здається, що малі ферми будуть менш здатні адаптуватися до регуляторних змін, оскільки вони менш імовірно будуть здатні інвестувати в технології зменшення викидів, такі як метанові реактори [26].

Таким чином, загальний консенсус серед дослідників полягає в тому, що пріоритетом у скороченні викидів молочних продуктів має бути підвищення ефективності. [24] зазначив, що вдосконалення знань, пов'язаних із підвищенням ефективності систем тваринництва, дозволить зробити вибір, який призведе до зменшення викидів. Подібним чином [27] вказав на важливість оцінки викидів у рамках виробництва, оскільки фермери не будуть впроваджувати стратегії пом'якшення, які скорочують виробництво, і оскільки збільшення населення світу означає, що сільське господарство в цілому має зосередитися на підвищенні ефективності. [28] помітили, що викиди парникових газів негативно корелюють з виробництвом молока, оскільки високе виробництво зменшує викиди від обслуговування.

Загалом, викиди CO₂ від дихання худоби та рослин не вважаються серйозними проблемами в контексті зміни клімату [27], оскільки вони є частиною безперервного біологічного процесу. У той час як основним джерелом викидів CO₂ є викопне паливо, сільськогосподарська практика забезпечує 40% і 90% глобального CH₄ і N₂O. Нітрифікація (рівняння 1) – це процес окислення амонію до нітриту та нітрату, з утворенням N₂O як побічного продукту, особливо анаеробної денітрифікації (рівняння 2).



Відомо, що гриби активно залучені до компостних систем [14]; процеси гетеротрофної нітрифікації та денітрифікації відбуваються за подібною схемою, що й у автотрофів.

У той час як денітрифікація вважається анаеробним процесом через факультативні анаероби, які найбільш ефективно працюють в аеробному середовищі, гетерогенне середовище компостної системи призводить до утворення анаеробних мікромісць і часто призводить до спільної аеробної та анаеробної діяльності, такої як сполучена нітрифікація, денітрифікація

Оптимізація раціонів корів також була в центрі уваги в контролі над викидами. Пасовищні молочні ферми, хоча споживачі часто сприймають їх як більш екологічно чисті, мають значно нижчу ефективність використання кормового азоту, ймовірно, через низький контроль дієти. [29] при оцінці вироблення метану відзначили, що генетичні варіації серед корів можуть відігравати навіть більшу роль, ніж лише харчування.

Окрім оптимізації середовища для корів, зберігання гною є очевидним пунктом контролю викидів. Метанові реактори стали ще одним варіантом, який все частіше досліджується. Температура впливає на профіль газових викидів анаеробного варочного котла, причому вища температура призводить до вищих викидів метану. Метанові реактори також мали високий рівень вилучення амонію. Однак на даний момент їх встановлення є дорогим і відносно непрактичним для невеликих ферм [30].

У розвинених країнах, таких як США, де харчування здебільшого оптимізоване, найбільші можливості для скорочення викидів виникають у покращенні генетики та дозволі коровам досягти генетичного потенціалу шляхом роботи над іншими факторами управління, як це вже зроблено для підвищення продуктивності корів. ККК вписується в цю картину, забезпечуючи покращений комфорт корів. Крім того, управління гноєм є ключовим фактором, що визначає викиди та стікання поживних речовин від молочних виробництв. Дослідження підтвердили, що компостування має зменшити загальні викиди. Однак ККК можуть мати ще більший потенціал у скороченні викидів. ККК – це система утримання молочного корівника з інтенсивним керуванням, у якій гній не збирається в окреме

сховище, як це спостерігається в більшості типів утримання; швидше, його компостують на місці. У більшості ситуацій все ще необхідне сховище рідини для переробки відходів із кормової алеї, але переважна більшість гною та сечі від корів потрапляє на камеру. Традиційно вимощений корівник має підстилаючий матеріал, на якому відпочивають корови, і більше додається за потреби, щоб утримувати корів переважно чистими та сухими, подібно до ККК. Однак проста підстилка не перемішується, що призводить до переважно анаеробної системи. Ця анаеробна система призводить до меншої мікробіологічної різноманітності та менш ефективного розщеплення матеріалу.

Крім того, розкладання матеріалів за відсутності кисню призводить до вищих рівнів небажаних викидів, таких як NH_3 . Денітрифікація в анаеробному середовищі також більш імовірно призведе до утворення N_2O . Зрештою, в основному аеробна обробка матеріалів має зменшити некишечні викиди до вищого відсотка CO_2 .

1.3. Проектування вимірювальної камери

Вимірювальні камери були широко використовуваним методом визначення викидів газу з ґрунту та деяких тваринницьких приміщень. Два первинні камерні класи - відкриті та закриті; обидва типи використовувалися з вентиляторами (динамічні) і без (статичні). У відкритому динамічному методі повітря проганяється через камеру з відомою швидкістю, і концентрації цікавих газів вимірюються в кожному місці. У закритій статичній системі камера без інших отворів розміщується поверх ґрунту, а нахил кривої концентрації використовується для визначення швидкості викидів.

Були також спроби створити такі варіанти, як відкрита лише з природним рухом повітря та закрита з вентиляторами для примусового змішування всередині камери. Проте з кожним методом пов'язано кілька проблем проектування.

Оскільки метою камери є визначення рівня викидів, репрезентативного для тестової області, очевидно, що бажано якомога менше порушувати природні процеси викидів. Таким чином, необхідно негайно вирішити такі проблеми, як різниця тиску та градієнти дифузії. Будь-яка камера певною мірою порушить один або обидва з них.

[31] розглянули деякі відмінності між відкритою та закритою камерами, вказавши на кілька причин, чому закрита камера може бути більш ефективною. Оскільки гази, що виділяються в закриту кришку, не розбавляються постійно, вони змогли виявити менші потоки. Крім того, вони встановили, що відкрита кришка повинна працювати при тиску, нижчому від навколишнього, щоб забезпечити проточну циркуляцію повітря, що забезпечує можливість потоку маси з ґрунту поза камерою.

Хоча вони визнали, що зменшення градієнта дифузії в закритій камері може впливати на виробництво N_2O і, таким чином, на викиди. [32] порівняли статичні та динамічні методи вимірювання CO_2 у ґрунті як індекс респірації ґрунту та виявили різницю в успішності обох методів. В обох випадках для поглинання CO_2 використовувався гідроксид натрію. Статичний метод показав, що потоки на 12% вищі, коли швидкість була нижче $100 \text{ mg } CO_2\text{-C m}^{-2}\text{h}^{-1}$, але в п'ять разів менші, коли потік був більшим за $100 \text{ mg } CO_2\text{-C m}^{-2}\text{h}^{-1}$. Статична камера мала кришку, яку знімали під час розміщення, щоб мінімізувати початкові порушення тиску, а динамічна камера мала вентилятори для перемішування на низькій швидкості. Вони змогли виправити різницю денних температур за допомогою Q10, але запропонували багато повторень, щоб врахувати іншу мінливість день у день. Крім того, вони виявили, що жодна камера не працює краще, ніж інша, ні на піщаному, ні на грубому піщаному ґрунті. Іншою проблемою, дещо незалежною від типу камери або змішування, є витік із камери над землею та під землею. У міру збільшення концентрації всередині камери в профілі ґрунту розвивається зворотний градієнт. Гази можуть дифундувати латерально в ґрунті для руху через більш сприятливий градієнт тиску або дифузії; цей тип витоку є функцією геометрії камери, глибини утворення газу, пористості ґрунту, заповненої повітрям, і коефіцієнта дифузії ґрунтового газу [33].

Манжета, вбудована в ґрунт під камерою, вирішує цю проблему, але приносить із собою кілька інших питань, таких як глибина введення, час розміщення та кріплення до основної частини камери. Як правило, у ґрунтознавстві рекомендується розміщувати манжету перед камерою, але це в першу чергу для того, щоб мінімізувати вплив турбування коренів, що не викликає занепокоєння в системах тваринництва. У випадку, коли манжета є окремою частиною від камери,

між ними часто робиться канавка, яка після розміщення заповнюється водою. Глибина розміщення сильно варіюється між дослідженнями, але коливається від 2,5 см до щонайменше 8 см.

Кілька факторів можуть визначити, чи відкриті чи закриті камери є кращими для кожної ситуації. Закриті камери можуть дозволити краще контролювати повітряний потік над поверхнею ґрунту, але це може не відповідати фактичному середовищу. Крім того, збільшення тиску всередині камери з часом зменшить будь-який масовий потік із ґрунту, а дифузія зменшиться у відповідь на зменшення градієнта концентрації між ґрунтом і повітрям камери. Вентиляційні отвори також допомагають підтримувати температуру та вологість, подібні до польових умов [34]. [35] запропонував, щоб усі камери мали вентиляційні отвори для вирівнювання тиску. Однак при проектуванні таких вентиляційних отворів слід бути обережним. [36] відзначили вищі викиди N_2O в середньому з вентильованих камер і тиск, який постійно нижчий за навколишнє, що може бути спричинено лише постійним видаленням повітря, спричиненим ефектом Вентурі. [34] аналогічно зауважив, що оскільки минулі дослідження, які намагалися пов'язати різницю тиску з масовою витратою, були непослідовними, натомість необхідно мінімізувати ефект Вентурі. Рівняння Бернуллі було використано для розробки нової конструкції вентиляційного отвору, який сповільнює вітер за допомогою конічної букви «Т» над вентиляційним отвором у верхній частині камери. По-перше, вони перевірили оригінальну конструкцію без Т-подібної частини як на непроникній, так і на ґрунтовій основі. Вони виявили, що на ґрунтовій основі не спостерігалось різниці тиску від зовнішнього. Однак на непроникній основі виникла різниця тиску. Це показало, що масовий потік відбувався з ґрунту до того, як могла виникнути різниця тиску, що призвело до очевидно вищих рівнів викидів. [37] показали подібні результати та співвіднесли падіння тиску на 1 Па з кожним збільшенням швидкості повітря через вентиляційний отвір на 1 м/с. [34] також зазначив, що вплив позитивного тиску, який розвивається в закритій камері, може бути меншим, ніж вплив негативного тиску в результаті погано сконструйованого вентиляційного отвору, і що складне співвідношення між різницею тиску та вимірюванням потоку газу вносить поправки після експерименту та обмежений у значенні. Т-подібна конструкція для

вентиляційного отвору використовувала співвідношення діаметрів, подібне до співвідношення швидкості вітру біля рівня землі та швидкості вітру на вході їх T-подібної частини. Профіль швидкості вітру спочатку оцінювався на основі ландшафту, але вимірювання підтвердили його оцінку як у трав'янистих, так і в низьких чагарникових умовах, причому співвідношення 1:5 добре працює.

Використання вентиляторів у камерах також широко обговорюється. Деякі припускають, що вентилятори створюють збурення тиску, які призводять до потоків, відмінних від природних [38, 39]. Однак [40] використали еталонний газ у лабораторній установці для порівняння ефектів змішування та виявили, що камери змішування вентилятором призводять до значно нижчої нормалізованої середньоквадратичної помилки, ніж камери без змішування. Крім того, виміряні потоки зі змішаних камер були значно ближчими до потоку, очікуваного від еталонного газу. Проектування камер із невеликим співвідношенням об'єму до висоти простору над водою також може мінімізувати потребу у змішуванні та збільшити чутливість камери [38].

1.4. Застосування у корівниках з компостовою камерою

При спробі застосувати такі дослідження до корівників з компостною камерою зрозуміло, що ідеального методу ще не розроблено. Деякі конструктивні міркування вже очевидні. На відміну від більшості попередніх досліджень, розвиток коренів не викликає занепокоєння, тому манжета для основи камери може бути лише корисною і може бути розміщеною одночасно з камерою. [38, 39] надають детальну довідкову інформацію про камерні вимірювання потоків газу, рекомендуючи розгортання не довше 60 хвилин, щоб мінімізувати вплив на ВВ і, таким чином, на біологічну активність; вимірювання мають відбуватися протягом певного діапазону часу, щоб зафіксувати часову мінливість, і має бути розгорнуто достатню кількість камер, щоб достатньо охопити територію.

В ідеалі камеру слід розгорнути в корівнику, а не розміщувати в ній компост, щоб підтримувати градієнт температури. Отже, два основні міркування, які залишаються, полягають у тому, чи використовувати вентилятори та чи використовувати відкритий чи закритий дизайн.

Найпростішою та найменш дорогою конструкцією була б закрита камера з низьким профілем і вимірюванням газу в одній точці в центрі камери. Однак компост має унікальний потенціал для умов високої вологості через його високий ВВ і високу температуру. Накопичення вологи в камері може не тільки призвести до помилок вимірювання, але й змінити процес дифузії так, що крива накопичення газу не буде репрезентативною.

Велика камера з прямим потоком повітря та датчиками на обох кінцях має підтримувати вологість і температуру на належному рівні, але швидкість потоку та вміст цього повітря мають бути подібними до повітря на такій висоті в усьому корівнику, оскільки це призведе до чистого повітря у більш високому градієнті дифузії; крім того, різниця концентрацій, ймовірно, буде надто малою по відношенню до похибки використовуваних датчиків. Третій варіант – використання Т-подібної конструкції, моніторинг швидкості повітря на вході та виході, а також моніторинг концентрації газу на вході, виході та в камері; хоча цей метод може бути найбільш репрезентативним, оскільки повітряний потік має бути найбільш схожим на умови без камери, він, очевидно, є найбільш недорогим. Кілька експериментів можуть визначити ступінь впливу цих варіантів дизайну на вимірювання.

Якщо конструкція закритої камери може працювати у вологому компостному середовищі, це може бути найкращим варіантом, оскільки для нього потрібно найменше компонентів і можна розгорнути більше камер. Компост можна помістити в контейнер у лабораторії та використовувати водяну баню для підтримки відповідної температури. Закрита камера, що містить датчики концентрації газу, відносної вологості та температури, продемонструє, наскільки функціональна система при підвищенні вологості, або навіть, чи є підвищення вологості достатньо значним, щоб викликати занепокоєння лише через годину вимірювання. Як альтернатива, відома концентрація дослідного газу може бути подана, поки камера підтримується при високій вологості.

Конструкція Т-подібної частини може потребувати лише двох датчиків газу, залежно від руху повітря всередині камери. Слід проводити вимірювання на вході, але якщо відбувається достатнє змішування, щоб не було накопичення газу в просторі над напором, може знадобитися лише вимірювання на вході та виході.

Подібним чином, якщо газ, який дифундує в простір над газом, не виходить із камери протягом періоду вимірювання, а концентрація на виході подібна до концентрації на вході, датчики потребують лише вхідний простір і простір над ним. Три датчики знадобляться у випадку коливання концентрації в усіх трьох місцях протягом періоду вимірювання.

1.5. Висновки за розділом. Мета і задачі дослідження

Незважаючи на високу концентрацію бактерій у корівнику, ферми, які перейшли з систем вільного виходу в Україні, досягли численних покращень продуктивності, ймовірно, завдяки підвищенню комфорту корів, що забезпечується корівниками з компостною камерою, де підстилаючий шар періодично розпушується для покращення роботи бактерій та компостування гною на місці.

Поліпшення комфорту корів було найбільшою перевагою, яку називали виробники, які переходили на ККК. Вміст вологи виявився головним фактором, що впливає на управління корівниками з компостною камерою. Однак важливо розуміти, що зв'язки між факторами середовища корівників створюють «павутину» взаємозв'язків, а не простий лінійний процес; окремі компоненти не можуть бути розділені. Виробники повинні керувати декількома змінними одночасно, щоб оптимізувати середовище корів для підвищення їх продуктивності. Хоча щоденні витрати на підстилаючий шар вищі порівняно з традиційними методами утримання, початкові інвестиції в корівники нижчі; крім того, підвищення комфорту корови, що призводить до більшої продуктивності молока, що може забезпечити економічну вигоду. Головною метою цього дослідження є розробка та випробування недорогої камери для фіксації вироблення парникових газів для використання у корівниках з компостною камерою. Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- 1) Виготовити прототип камери для вимірювання викидів з використанням готових компонентів.
- 2) Відкалібрувати недорогі газові датчики CH_4 , CO_2 і NH_3 окремо та при використанні в камері для вимірювання викидів.
- 3) Розгорнути камеру заміру викидів у корівнику з КК, щоб зібрати попередні дані про важливі рівні викидів газу.

РОЗДІЛ II. Прототип камери для вимірювання викидів парникових газів

2.1. Дизайн вимірювальної камери

Середовище компостування викликає потребу в унікальному наборі вимог до камери, як описано в Розділі 1. Було обрано статичну схему камери з невеликим вентилятором, що порушує межовий шар, і датчиками вологості, температури, NH_3 , CO_2 і CH_4 . Загалом, конструкція вимірювальної камери базується на використанні датчиків, здатних вимірювати на високій частоті. Це відрізняється від типових систем, які вимагають ручного видалення повітря кілька разів на годину, і мають значно нижчу вартість, ніж фотоакустична система вимірювання. Порівняно низька точність окремих датчиків компенсується збільшенням частоти вимірювань без збільшення трудозатрат або збоїв у системі.

Більше того, менш імовірно, що камерна система пропустить важливі зміни, як це часто трапляється, коли для визначення викидів використовується лише кілька точок на годину [41]. Невеликий розмір камери призводить до меншого усереднення мікросайтів, ніж у великих системах; таким чином, багато камер слід використовувати для адекватного захоплення просторових варіацій системи, але «багато» є економічно доцільним через нижчу вартість камери та дозволяє подальший геостатистичний аналіз [42].

2.2. Методика та матеріали досліджень

Чашу для змішування з нержавіючої сталі використовували як корпус камери з площею $0,05 \text{ м}^2$ і об'ємом вільного простору $5,4 \text{ л}$ (без урахування місця, зайнятого компонентами всередині камери). Вентилятор діаметром 120 мм із широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ) був включений із змінною швидкістю; було продемонстровано, що швидкість руху повітря над компостом 1 м с^{-1} адекватно порушує прикордонний шар фізично подібних поверхонь [43, 44]. Датчики температури та вологості були підвішені по центру в камері та підключені до плати Measurement Computing USB-2408 DAQ (Measurement Computing Corporation, Norton, MA).

Придбано інфрачервоні датчики для вимірювання CO_2 і CH_4 , а для NH_3 – електрохімічний датчик. Кожен із двох типів було придбано з власною платою

оцінки та програмним забезпеченням для обробки вихідних напруги та струму за потреби.

Інфрачервоне вимірювання ґрунтується на принципі, згідно з яким молекули збуджуються світлом, що призводить до певних моделей поглинання через вібраційну активність. Молекули, які є асиметричними або мають моди коливань, що призводять до чистих диполів, можна виміряти ІЧ-сенсорами. Однією з труднощів при виявленні газу за допомогою ІЧ-випромінювання є робота у «водяних вікнах», особливо при вищій вологості. Піки, викликані водою, можуть перекривати піки газів, які необхідно виявити; найбільш корисними є ті зони, які включають досліджувані гази, але виключають воду. Діапазон від 3 до 5 мікрон дозволяє виявити CO_2 близько до 4,2 мікрон а вуглеводні – від 3,5 до 5 мікрон.

Спочатку був обраний ІЧ-датчик IR15TTR. Цей пристрій виявляє CO_2 і CH_4 в діапазоні 0-100% і містить внутрішній термістор. Він працює на кілька градусів вище температури навколишнього середовища завдяки теплу, що виділяється ІЧ-лампкою; це тепло також служить для компенсації конденсації води. Згодом IR15TTR було замінено подібними датчиками, що працюють у меншому діапазоні концентрацій, коли було визначено, що концентрації в полі будуть занадто малими для виявлення за допомогою датчика 0-100%. CO_2 вимірювали за допомогою IR15TT-M, тоді як IR22EJ було придбано для вимірювання CH_4 .

Разом із датчиком було придбано ІЧ-оціночну плату (IR-EK2, SGX Sensortech, High Wycombe, Великобританія). Сама плата живиться від джерела постійного струму 9 В і підключається до комп'ютера через USB. На комп'ютері встановлено супутнє програмне забезпечення. Перша вкладка в програмі (рис. 2 Перша вкладка програмного забезпечення SGX) має область моніторингу для візуалізації різних виходів з плати, що регулюється за допомогою спадного меню. Напруга лампи, опорної напруги та напруги каналу встановлювалися шляхом регулювання потенціометрів на платі, поки різні напруги приблизно не досягли рекомендованих значень. Це критично важливий початковий крок.

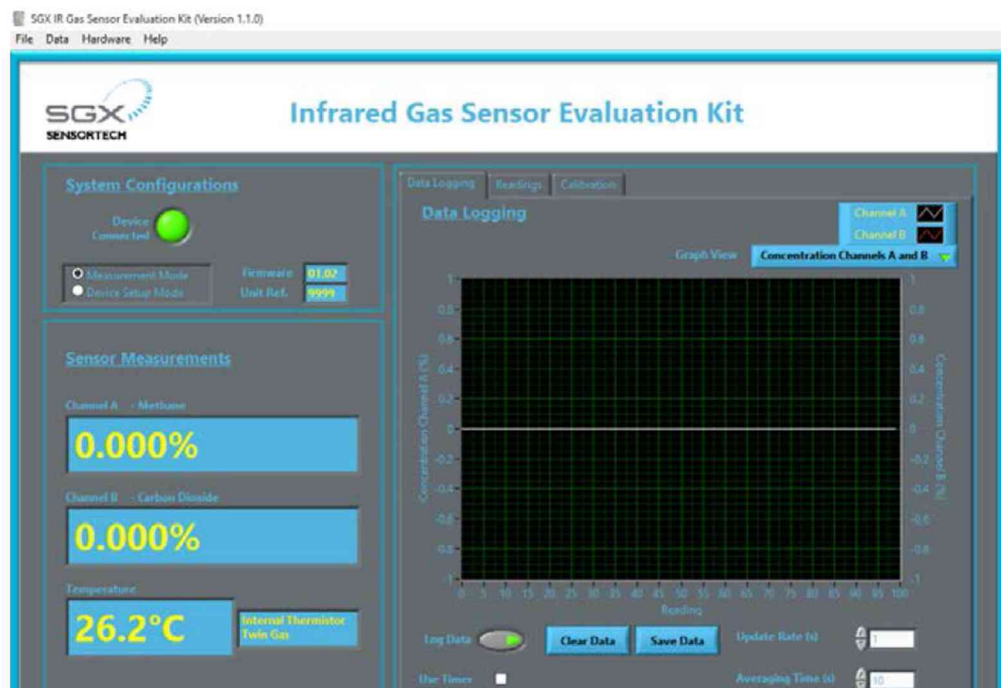


Рисунок 3. Перша вкладка програмного забезпечення SGX

Третя вкладка (рис. 4) призначена для калібрування датчика; редактор коефіцієнтів доступний у режимі налаштування пристрою, який за замовчуванням витягує з інсталяційного компакт-диска параметри, рекомендовані компанією для перетворення напруги в концентрації, а кнопки «Set Span» і «Set Zero» дозволяють виконувати двоточкове лінійне калібрування датчику.

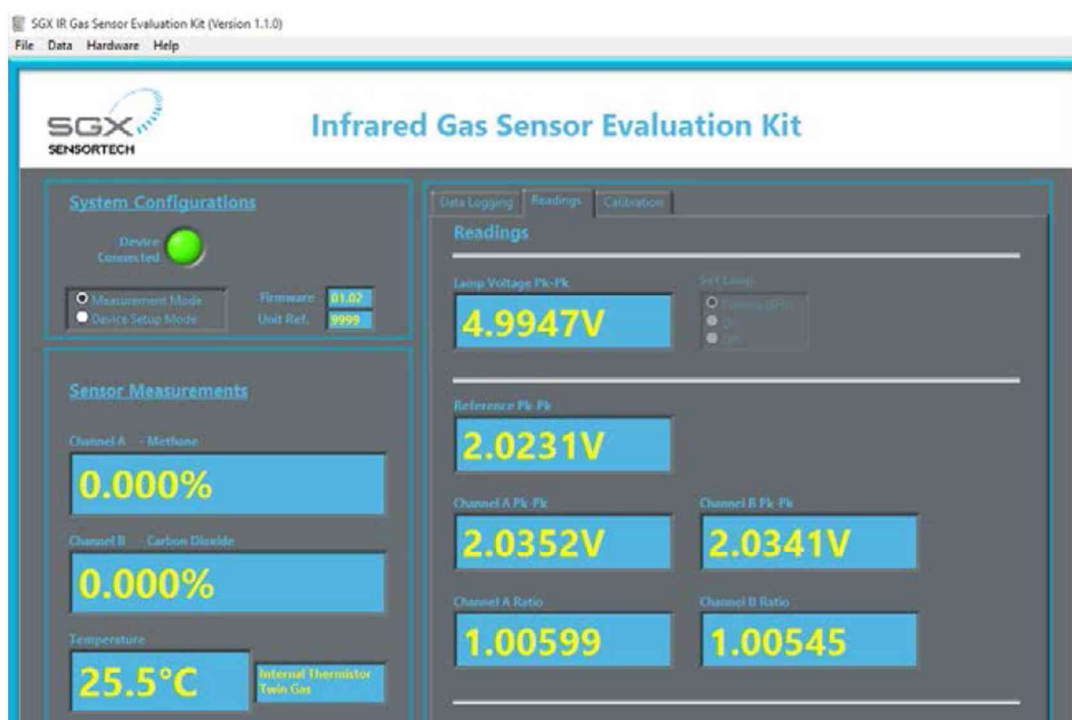


Рисунок 4. Вкладка регулювання напруги програмного забезпечення SGX

Електрохімічні датчики функціонують шляхом створення хімічної реакції між газом і киснем, що міститься в датчику, що призводить до струму, пропорційного концентрації газу. Електрохімічним датчиком був датчик 0-100 ppm NH₃, SGX-7NH3 (SGX Sensortech, High Wycombe, UK). Також присутній термістор для вимірювання температури навколишнього середовища. Оціночна плата, придбана для цього типу датчика (ECVQ-EK3, SGX Sensortech, High Wycombe, Великобританія), так само використовує 9 В постійного струму та з'єднання USB. Для електрохімічної оцінки було встановлено окреме програмне забезпечення. Процес калібрування ідентичний процесу калібрування ІЧ-датчика з використанням відповідного газу.

Приблизні значення для датчиків вже були визначені SGX Sensortech і надані для легкого завантаження в програму; калібрування дозволяє налаштувати їх для конкретного датчика, який використовується. Оригінальне програмне забезпечення забезпечило чудовий інтерфейс для процесу калібрування; однак він був призначений в першу чергу для калібрування та мав обмеження, коли йшлося про довгостроковий збір даних. Зокрема, хоча функція збереження даних була доступна, вона не реєструвалася в журналі, а попередні дані не зберігалися, якщо користувач не запитав. Оскільки дані зберігалися в пам'яті лише під час збирання, а не записувалися у файл, це створювало ризик втрати всіх даних у разі переривання процесу.

У Microsoft Visual Studio (Microsoft Visual Studio 2015, Microsoft Corporation, Redmond, WA) було розроблено програму для одночасного запису вимірювань від датчиків газу, температури та вологості (рис. 2-3). Програма зчитувала вхідні дані з трьох джерел через USB: плату DAQ, плату ІЧ оцінки та плату електрохімічної оцінки. Було реалізовано таймер, який запускав вимірювання з усіх датчиків щосекунди. Напруги, що відповідають температурі та вологості, зчитувалися з виходу плати DAQ і перетворювалися на температуру (за Цельсієм) і відносну вологість (у відсотках) у межах програми (рис. 5).

The screenshot shows the ChamberMeasIR software window. It is divided into several sections:

- CO2 Section:** Includes a dropdown menu set to 'COM3', a 'Disconnect' button, and input fields for 'Ref pk-pk' (1.351802), 'Active pk-pk' (0.358380), '[CO2], ppm' (898), 'Temp, C' (+25.9), and 'Bulb pk-pk' (1.653900). Below these is a 'Raw output' text box containing the string: [EK2 SEN A8F9 A9CE 2CCC 0000000 0000000 +25.9 CEBC].
- CH4 Section:** Includes a dropdown menu set to 'COM5', a 'Disconnect' button, and input fields for 'Ref pk-pk' (0.763730), 'Active pk-pk' (1.634900), '[CH4], ppm' (231), 'Temp, C' (+27.6), and 'Bulb pk-pk' (1.656244). Below these is a 'Raw output' text box containing the string: [EK2 SEN 5F77 CC5C 000A 0000000 0000000 +27.6 CF07].
- DAQ board measurements Section:** Contains input fields for 'Temperature' (V and C), 'Humidity' (V and % RH), and 'NH3' (mV and ppm). The current values are 0.068 mV and -9 ppm for NH3. Below this is a 'Board name' field with 'USB-2408' and a 'Board errors' field with the text 'No error has occurred..No error has occurred..No error has occurred'.
- Logging Section:** At the bottom, there is a 'Start Logging' button and a 'Seconds logging:' field.

Рисунок 5. Програма, розроблена для збору експериментальних даних

ІЧ-зчитування являло собою рядок із кількох компонентів із короткими повідомленнями користувача у вигляді тексту та числовими значеннями, представленими у шістнадцятковому форматі. Щоб визначити, як обробляти різні компоненти вхідного рядка, було використано посібник користувача комплекту оцінки SGX Sensortech. Числові показання включали еталонну та активну напруги каналів, напругу ІЧ-лампи, температуру на ІЧ-датчику та концентрації, визначені мікропроцесором на платі оцінювання. Напруги були розраховані за формулою:

$$V_{IR} = D_{in} * \frac{2.048}{65535}, \quad (3)$$

де V_{IR} – будь-яка вихідна напруга інфрачервоної плати, а D_{in} – цифрове показання.

Зчитування електрохімічної плати було подібним, але трохи простішим, ніж ІЧ-зчитування, оскільки це був датчик одного газу та тому, що для обчислення

концентрації потрібен був лише струм, а не кілька напруг. Шістнадцяткові вихідні дані також можуть бути безпосередньо перетворені в струм (nA) і концентрацію (ppm).

Дисплей програми дозволяв вибрати COM-порти за допомогою кнопки «підключити» для початку читання даних. Необроблений вихід кожного газового датчика відображався на додаток до окремих текстових полів для кожного компонента після того, як його було перетворено у відповідний, зручний формат. Подібна процедура відбулася для показань плати DAQ, де напруга відображалася на додаток до температури та вологості. Вікно повідомлень дозволяло легко спостерігати за помилками плати збору даних.

Натиснувши кнопку «Почати ведення журналу», користувачеві буде запропоновано зберегти файл, у який буде включено час, еталонну напругу ІЧ (V), напругу активного каналу CH4 (V), активний канал CO₂ пікова напруга (V), концентрація CH₄ (ppm), концентрація CO₂ (ppm), ІЧ-температура (°C), напруга ІЧ-лампи (V), електрохімічна напруга зсуву (mV), концентрація NH₃ (ppm), електрохімічний вихідний струм (nA), концентрація газу електрохімічного калібрування (ppm), струм електрохімічного калібрування (nA), електрохімічна температура (°C), електрохімічний діапазон (низький = 5 nA, високий = 25 nA підсилення на крок АЦП), електрохімічний вибраний діапазон, температура всередині камери напруга датчика (V), температура всередині камери (°C), напруга датчика вологості всередині камери (V) і вологість всередині камери (%) реєструвалися кожну секунду.

2.3. Інтерпретація результатів

Оригінальне програмне забезпечення від SGX Sensortech дозволяло записувати калібрувальну інформацію в мікропроцесор на платі оцінки, щоб можна було обчислити концентрації до того, як їх зчитує ПК. Спочатку було вирішено знехтувати цією функцією в новій програмі, замість цього розраховувати концентрацію в програмному забезпеченні ПК. Недоліком цього методу є те, що датчики, якщо їх підключити за допомогою іншої програми, можуть більше не

давати точні концентрації; це не повинно бути проблемою для цього застосування датчиків, але була також написана невелика додаткова програма, щоб увімкнути запис до мікропроцесора на кожній платі (рис. 6).

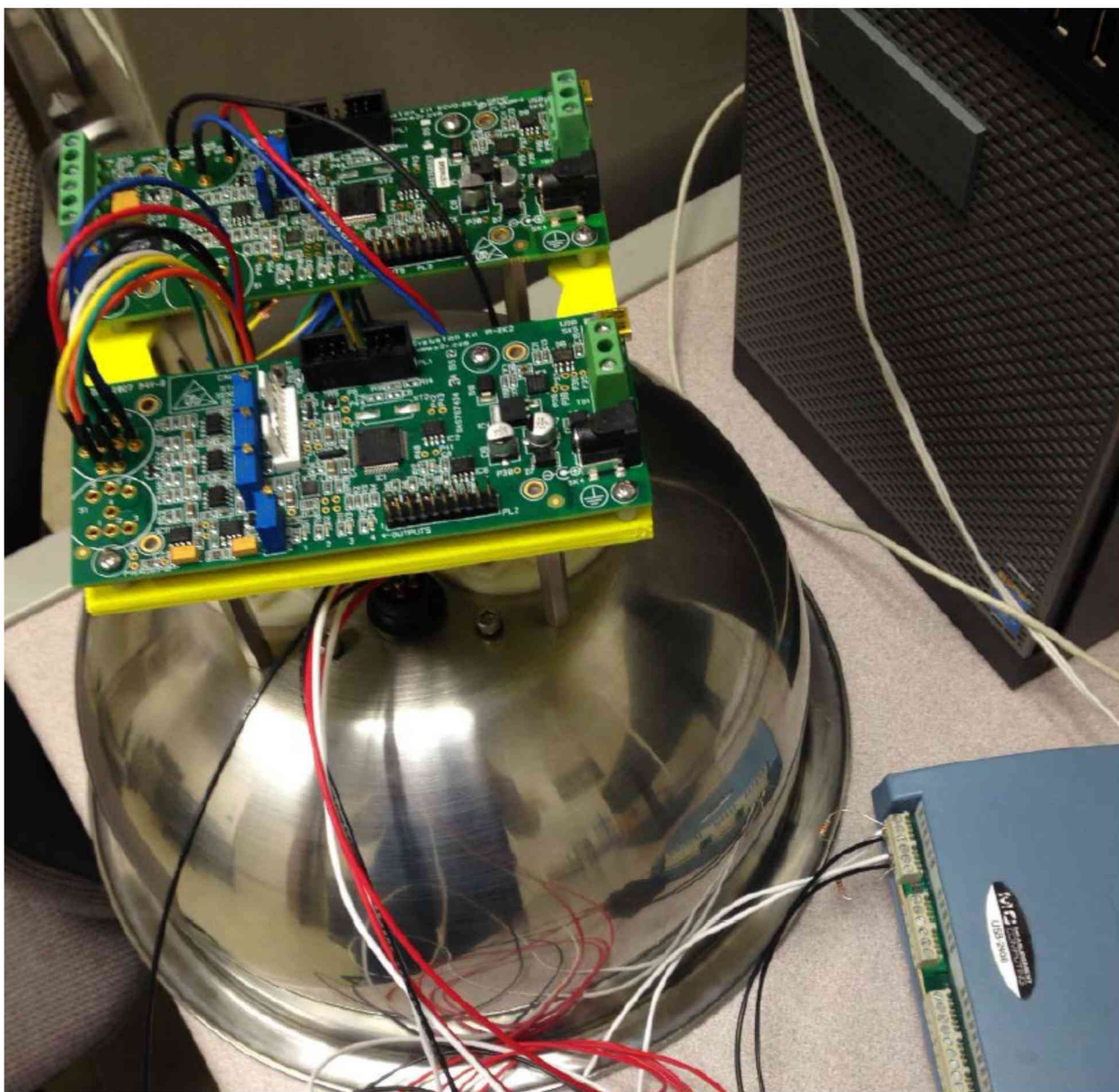


Рисунок 6. Прототип камери складається з чаші для змішування з датчиками, вставленими у верхній частині.

2.4. Висновки за розділом

Було розроблено прототип вимірювальної камери, який є менш дорогим, ніж фотоакустичні камери, і має вищу швидкість збору даних, ніж методи газової хроматографії. Наступним кроком є виконання двоточкового калібрування системи для кожного з газів і з урахуванням дещо інших можливостей щодо замірів значень температури та вологості.

РОЗДІЛ III. КАЛІБРУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ КАМЕРИ ВИДІЛЕННЯ ГАЗІВ

3.1. Методика калібрування пристрою по досліджуваних речовинах

SGX Sensortech надає оцінки коефіцієнтів калібрування для своїх датчиків на основі значень, отриманих у їхній лабораторії. Однак очікується, що в середовищі компостування температура та вологість відіграватимуть важливу роль, а виміряні потоки будуть дуже малими. Калібрування допомагає підвищити точність датчика в польових умовах.

Було придбано сертифіковані калібрувальні гази для калібрування датчика на нульовому рівні та рівні «діапазону», що дорівнює або нижче верхнього діапазону датчика, охоплюючи значення, очікувані в середовищі компостування. Концентрації були обрані 100 ppm NH₃, 100 ppm CH₄ і 1500 ppm CO₂. Пізніше за допомогою ГХ було визначено концентрації від 8 до 578 ppm CH₄ і від 531 до 6580 ppm CO₂.

Гази зберігали при кімнатній температурі. Швидкість потоку встановлювали на 1,5 л/хв за допомогою витратоміра Dwyer, що працює при найнижчому можливому тиску, що регулюється за допомогою клапана Consoa.

Спершу газові датчики калібрували окремо, оскільки одночасне калібрування всієї камери зайняло б не лише багато часу, але й було б чутливим до змін через витоки. Газова лінія проходила від витратоміра до невеликої калібрувальної камери, наданої SGX, яка щільно прилягала до датчиків (рис. 7); низький об'єм призводив до мінімального часу очищення, щоб можна було швидко ідентифікувати відповідь датчика.

Системі знадобилося від 1 до 5 хвилин для стабілізації, після чого реплікація вважалася завершеною. Було проведено три повторення для кожного з трьох датчиків, порядок визначено за допомогою генератора випадкових чисел. Гази відводили у витяжну шафу (рис. 8).

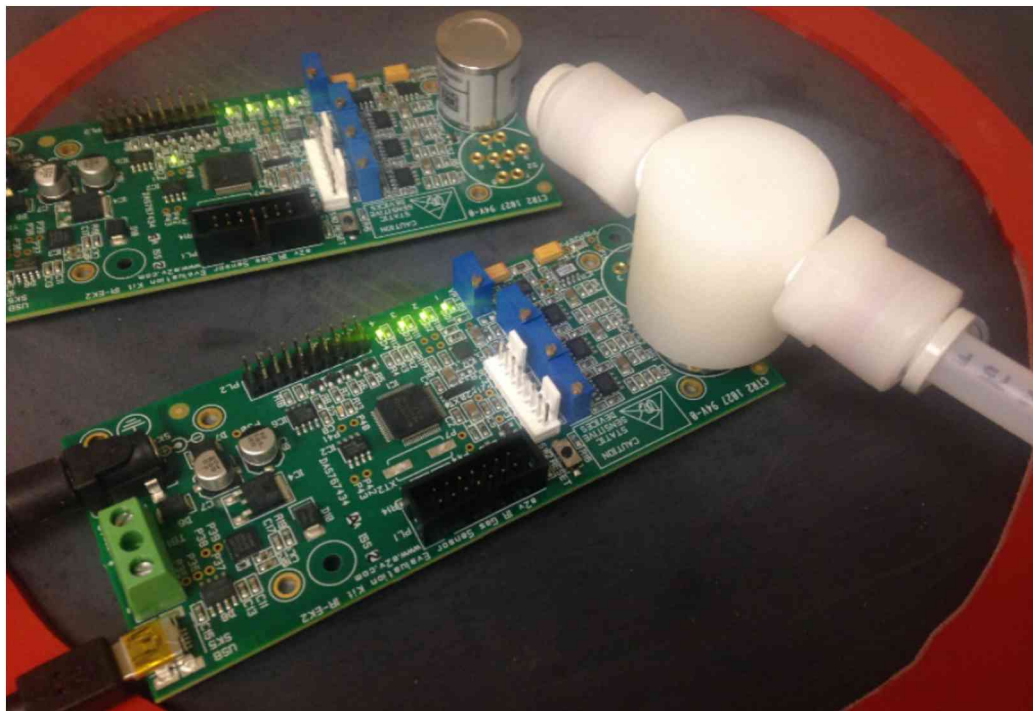


Рисунок 7. Процес калібрування окремо взятого датчика.

Для електрохімічного датчика вихідний струм використовувався для визначення лінійної реакції датчика на концентрацію газу, як зазначено в електрохімічній примітці 2 SGX Sensortech. Для інфрачервоного датчика з CH_4 і CO_2 вихід напруги кожного каналу використовувався для визначення експоненціального відповідь, як у примітках 2 і 5 SGX Sensortech IR.



Рисунок 8. Калібровка датчиків у витяжній шафі під час роботи програми на планшетному ПК.

Після калібрування датчиків процес повторювався з камерою в цілому, щоб визначити час реакції системи на крок. Монтажна основа була розроблена для герметизації камери та забезпечення потоку калібрувальних газів через камеру.

Очікуваний час продувки визначали як функцію швидкості потоку, об'єму камери та зміни концентрації газу; наявність окремих датчиків, які вже були відкалібровані, дозволяла легко порівняти з теоретичною кривою, причому значні відхилення вказували на проблему герметичності камери.

Очікується, що поверхня компосту буде в межах робочого діапазону датчиків як температури, так і вологості, особливо влітку; сценарій MATLAB був розроблений для підтвердження часу до насичення повітря в камері, прогнозування ймовірності конденсації. При низькій температурі поверхні компосту та високій температурі навколишнього середовища відносна вологість у камері досягає приблизно 72%. Однак і температура, і вологість можуть досягати досить екстремальних рівнів, щоб вплинути на показники концентрації. Датчики температури та вологості були відкалібровані у кліматичній камері при 25 C і 60% RH і при 13 C і 85% RH, щоб отримати загальне уявлення про температуру та вологість під час розгортання. Польові дані, отримані пізніше, підтвердили, що вплив був мінімальним, незважаючи на деяку конденсацію, яка виникла на пізніх етапах розгортання після перемішування.

2.2. Інтерпретація результатів калібрування

Скрипт у MATLAB був написаний для визначення значень стаціонарного стану для кожного повторення, а середні значення стаціонарного стану використовувалися в рівняннях калібрування. Для наближення концентрацій як функції вихідних сигналів ІЧ-датчика було використано посилання на Примітку 2 щодо застосування інфрачервоного випромінювання SGX за допомогою наступних рівнянь:

$$Zero = \frac{V_{act,zero}}{V_{ref,zero}}, \quad (4)$$

де $V_{act,zero}$ – напруга активного каналу в нульовому калібрувальному газі, а $V_{ref,zero}$ – еталонна напруга каналу в нульовому калібрувальному газі;

$$Span = \frac{1 - \frac{V_{act,span}}{Zero * V_{ref,span}}}{1 - e^{-ac^n}}, \quad (5)$$

де $V_{act,span}$ – напруга активного каналу в газі для калібрування діапазону, $V_{ref,span}$ – напруга еталонного каналу в газі для калібрування діапазону, α – коефіцієнт калібрування (за оцінками SGX становить 1,01), C – газ для калібрування діапазону в відсоток, а n – калібрувальний коефіцієнт (за оцінками SGX становить 0,675);

$$NR = \frac{V_{act}}{Zero * V_{ref}}, \quad (6)$$

де NR – нормалізоване співвідношення, V_{act} – напруга активного каналу, а V_{ref} – напруга опорного каналу;

$$NR_{comp} = NR * (1 + \alpha(T - T_{cal})), \quad (7)$$

де NR_{comp} — компенсоване нормалізоване відношення, α — коефіцієнт температурної компенсації (за оцінками SGX становить 0,0005), T — температура, виміряна ІЧ-датчиком, а T_{cal} — температура, при якій було виконано калібрування, виміряно ІЧ-датчиком;

$$Span_{comp} = Span + (\beta * \frac{T - T_{cal}}{T_{cal}}), \quad (8)$$

де $S_{pancomp}$ – значення діапазону температурної компенсації, а β – коефіцієнт температурної компенсації (за оцінками SGX становить 0,3); і

$$C_{ppm} = \left(-\frac{\ln\left(1 - \left(\frac{1 - NR_{comp}}{span_{comp}}\right)\right)}{a} \right) * \left(\frac{1}{n}\right) * 10000 \quad (9)$$

де C_{ppm} – це концентрація газу в частках на мільйон (об'єм/об'єм), а 10000 – коефіцієнт перетворення від відсотків до ppm.

Після початкового застосування рівнянь SGX було виявлено, що розрахунок концентрації постійно дає результат, який на певний коефіцієнт відрізняється від результату сертифікованого калібрувального газу. Коефіцієнти «а» і «n» були скориговані, щоб мінімізувати RMSE, і обидва змінені на значення 1. Електрохімічна оцінювальна плата створювала струми, які довільно змінювали знак, що вказувало на те, що плата не працювала, а очевидний вихідний сигнал був просто шумом. Оцінка самого датчика за допомогою цифрового мультиметра підтвердила,

що датчик NH_3 окремо працює, хоча вихідний струм не відповідає очікуваному діапазону. Між вихідним і заземлюючим електродами був запущений резистор 100 Ом для перетворення сигналу струму в сигнал напруги, а плата збору даних, яка вже використовується для датчиків температури та вологості, виробляла корисний сигнал, який дозволяв калібрувати та, можливо, також збирати дані.

Стаціонарний стан для датчика аміаку було знайдено подібним чином, як і для ПЧ-датчиків. За умов, близьких до навколишнього середовища, очікується лінійний відгук; таким чином, процедура калібрування за двома точками була визнана адекватною, і коефіцієнти калібрування можна було визначити за допомогою $y = mx + b$ у формі

$$C_{pred} = \left(\frac{C_{span}}{V_{max} - V_{min}} \right) V - \frac{C_{span} V_{min}}{V_{max} - V_{min}}, \quad (10)$$

де C_{pred} – прогнозована концентрація аміаку в ppm, C_{span} – значення максимальної концентрації газу в ppm, V_{max} – вихідна напруга при максимальній концентрації, V_{min} – вихідна напруга при мінімальній концентрації (вважається нульовою в умовах навколишнього середовища), а V – показання напруги.

Хоча показники нульового газу були дещо розсіяними через шум у платі DAQ, що призводило до змінного ненульового виходу, нахил був послідовним. RMSE було розраховано за допомогою трьох калібрувальних випробувань, що дозволило розробити інтервали прогнозування (Таблиця 1).

$$95\% PI = \pm 2 * RMSE, \quad (11)$$

Таблиця 1. Дані концентрацій досліджуваних газів при калібрування пристрою

Сенсор	«Низька» концентрація калібрувального газу	«Висока» концентрація калібрувального газу
CH_4	0 ± 10 ppm	100 ± 15 ppm
CO_2	0 ± 3 ppm	1500 ± 6 ppm
NH_3	0 ± 3 ppm	100 ± 6 ppm

Графіки прогнозованих та фактичних концентрацій CH_4 були побудовані за результатами двоточкового калібрування (рис. 9)

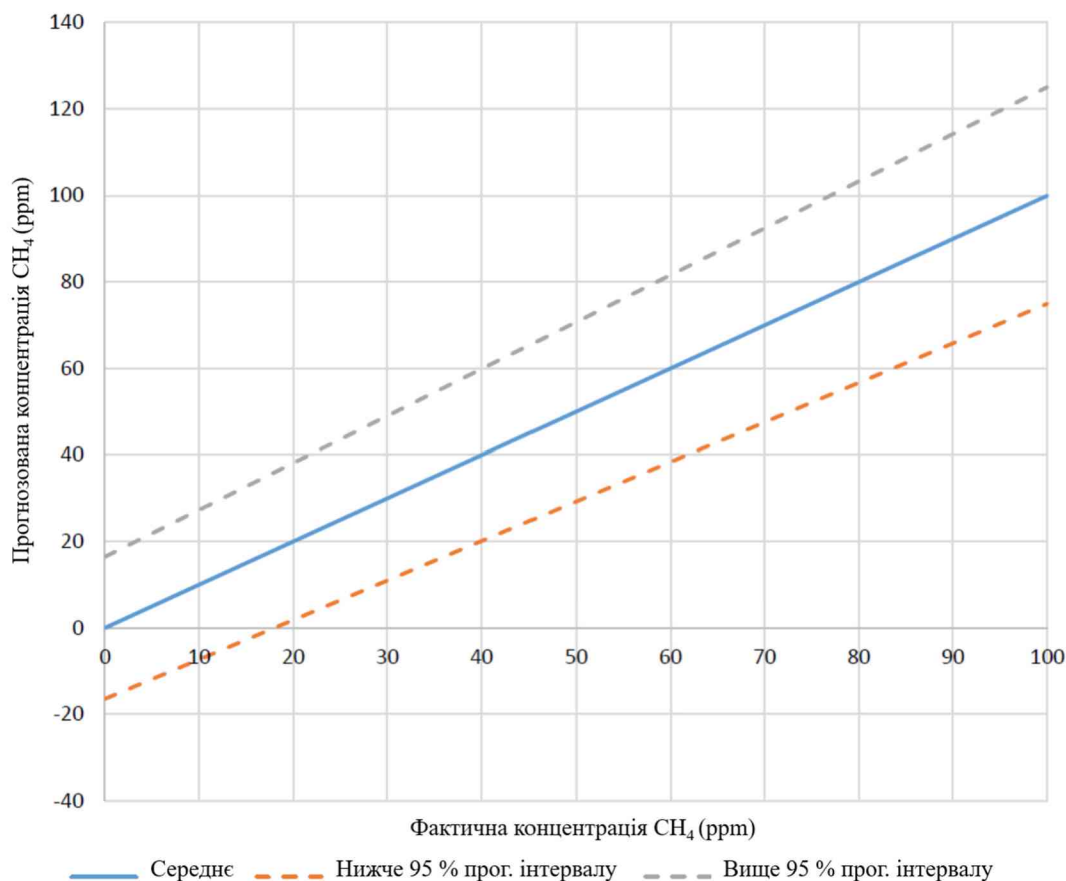


Рисунок 9. Графік прогнозованих та фактичних концентрацій CH_4

Графіки прогнозованих та фактичних концентрацій CO_2 були побудовані за результатами двоточкового калібрування (рис. 10)

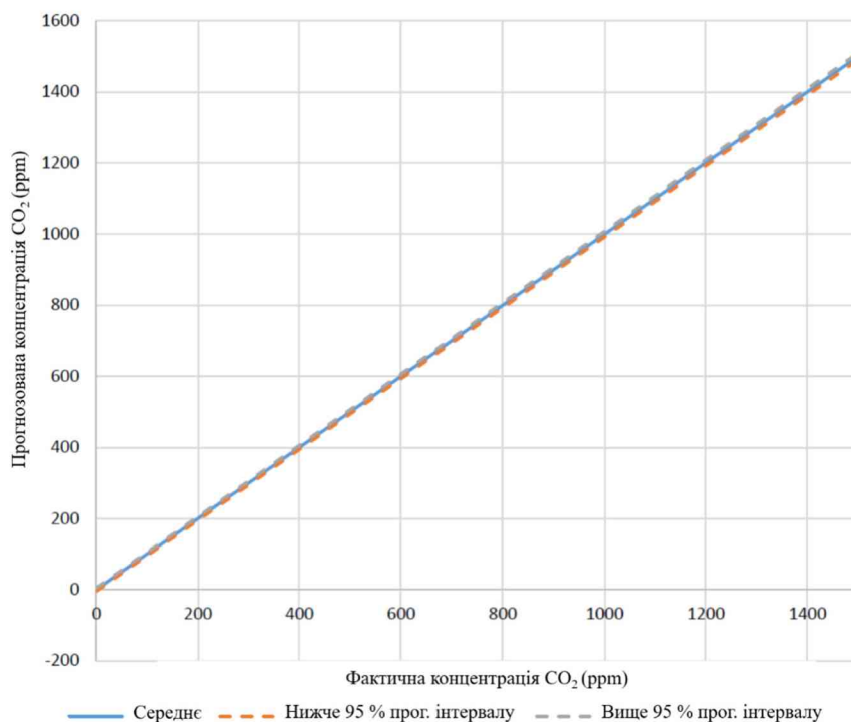


Рисунок 10. Графік прогнозованих та фактичних концентрацій CO_2

Графіки прогнозованих та фактичних концентрацій NH_3 були побудовані за результатами двоточкового калібрування (рис. 11)

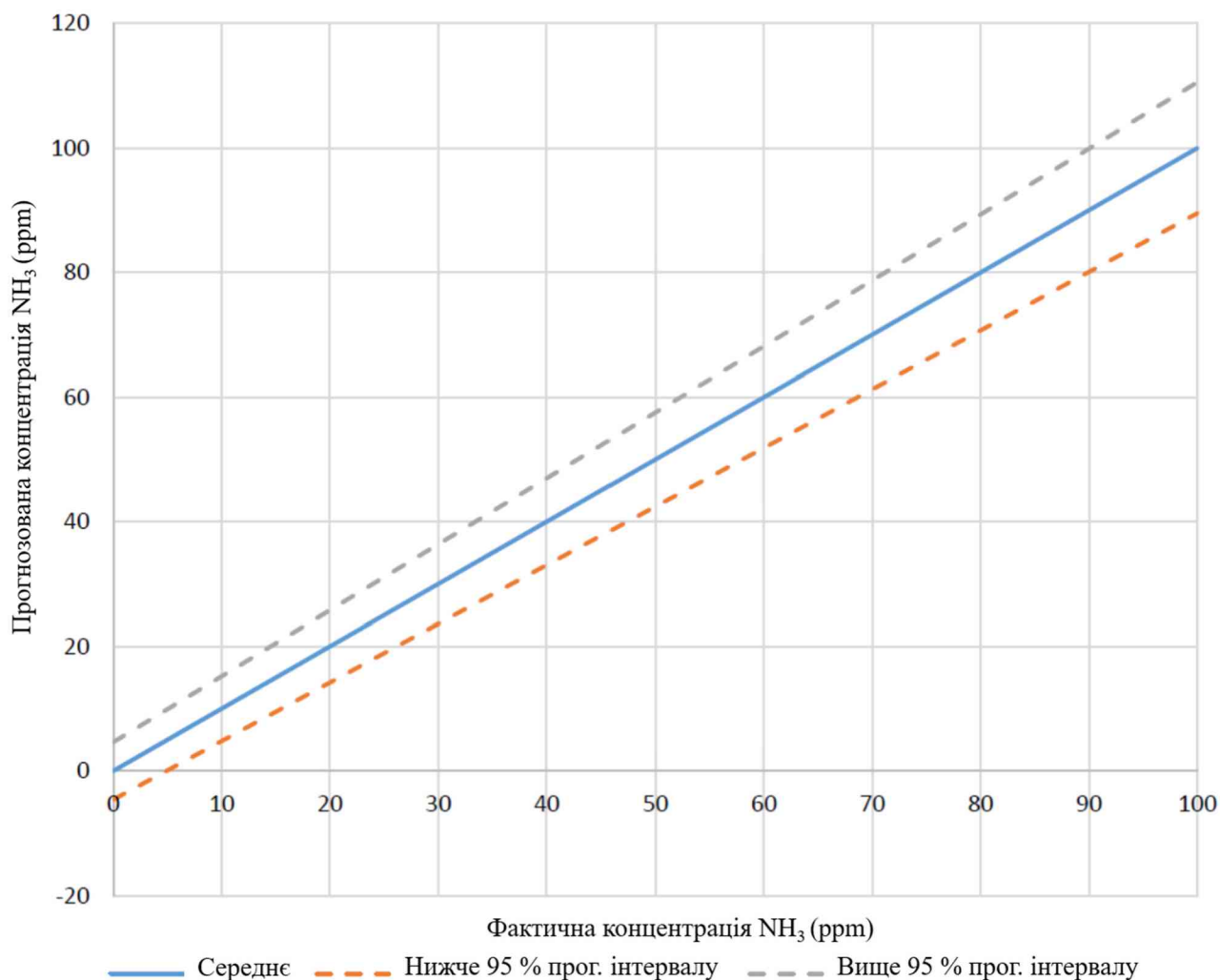


Рисунок 11. Графік прогнозованих та фактичних концентрацій NH_3

Продувку камери спочатку проводили при швидкості потоку $1,5 \text{ л CO}_2 \text{ хв}^{-1}$, досягаючи постійної максимальної концентрації приблизно через 15 хвилин. У цей момент вихідний отвір основи камери був заклеєний за допомогою стрічки, щоб зменшити подальший обмін із навколишнім повітрям. Запис концентрації тривав протягом ночі; зміна концентрації по відношенню до часу використовувалася для оцінки герметичності камери без потоку газу.

Оскільки впускний отвір залишився приєднаним до газових ліній, був можливий негативний протитиск, і стрічка над вихідним отвором могла не бути ідеальною герметизацією. Однак, незважаючи на ці два штучні недоліки в герметизації камери, падіння концентрації було менш ніж на 10% протягом першої години після вимкнення потоку калібрувального газу. Це було визнано достатнім для відносно короткого часу розгортання в ККК, щоб продовжити без більш конкретного націлювання на витіки. Графік процесу очищення вимірювальної камери вуглекислим газом представлений на рис. 12.

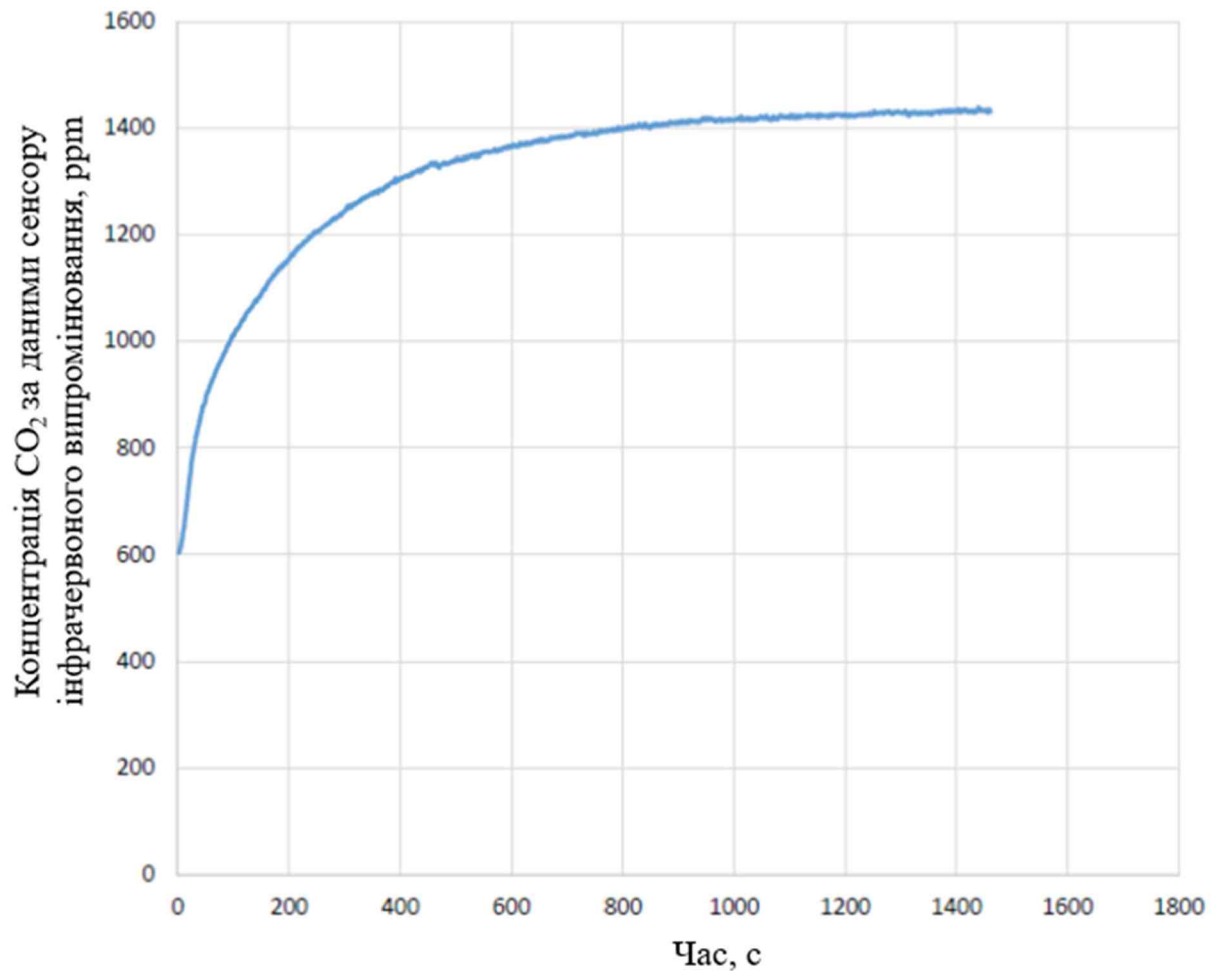


Рисунок 12. Процес очищення вимірювальної камери вуглекислим газом

2.3. Висновки за розділом

Калібрування призвело до достатньо малих інтервалів прогнозування, щоб передбачити відносно невеликі зміни концентрації, як очікувалося в умовах ККК. Пізніше тестування датчика NH_3 дало змінну напругу нульового газу. Непередбачуваний дрейф датчика NH_3 ускладнював його включення; таким чином, було вирішено використовувати дві плати ІЧ-оцінки для вимірювання CH_4 і CO_2 , а також отримати значення для N_2O в полі лише за допомогою газової хроматографії.

РОЗДІЛ IV. ЗАМІРИ ВИДІЛЕННЯ ГАЗІВ У КОРІВНИКАХ З КОМПОСТНИМИ КАМЕРАМИ

4.1. Методика польового випробування

Середовище корівника з компостною камерою унікальне тим, що воно сильно залежить від активності мікробів. Підтримка середовища, сприятливого для типового мікробного різноманіття системи, непрактична в лабораторних умовах; тому необхідне тестування у виробничих умовах. Очікується, що зміни у викидах будуть найбільшими відразу після обробки ґрунту, стабілізуючись з часом. Денна тенденція не очікується, оскільки на температуру компосту мінімально впливають помірні зміни температури навколишнього середовища, а сонячна радіація незначна через закриті приміщення.

Випробування були проведені на фермерському господарстві Полтавської області. Обробіток ґрунту відбувається двічі на день. Початкове вимірювання тривало протягом однієї години, щоб мінімізувати вплив вологості, як рекомендовано в протоколах USDA-ARS GRACEnet [45]; після оцінки першого набору даних було визначено, що 25 хвилин буде достатнім часом розгортання для отримання точної кривої концентрації. У таблиці 4-1 наведено кілька параметрів вибірки для 4 днів збору даних. Важливо визнати вплив вологості компосту на мікробну динаміку і, таким чином, утворення газу [46]; на додаток до вимірювання концентрації газу, зразки компосту були зібрані для аналізу вмісту вологи (табл. 2).

Таблиця 2. Схема відбору проб

Дата	Обробка ґрунту	Розгортання	ВВ, %	Газ
15.06	до обробки	1	46	CO ₂
21.06	після обробки	1	31	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
29.06	обидва	3	44 – 46	–
6.07	після обробки	3	49	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

Перед першим розгортанням камеру було модифіковано для ручного відбору проб як для компенсації відсутності датчика N₂O, так і для порівняння з добре встановленим методом щодо електронних датчиків. Бутилкаучукова перегородка

була додана до стінки камери для можливості ручного вилучення шприцом. Зазвичай менше 1% об'єму камери було вилучено під час вимірювань із систем тваринництва; крім того, документ GRACEnet рекомендував видалення газу не менше 30 мл за час відбору, щоб мінімізувати збурення тиску. Для збору газу використовувався 20-кубовий шприц із ручним відбором проб (рис. 13) кожні 20 хвилин, що призвело до чотирьох вимірювань концентрації за розгортання (t_0 , t_{20} , t_{40} , t_{60}). Після кожного відбору застосовували легкий тиск на поршень шприца, коли запірний кран закривали, щоб забезпечити односпрямований потік газу назовні, доки шприц не міг бути герметизованим замком Люера, запобігаючи розведенню зразка навколишнім повітрям. Аналіз за допомогою газової хроматографії проводився в ґрунтознавчій лабораторії протягом 48 годин після відбору зразка.

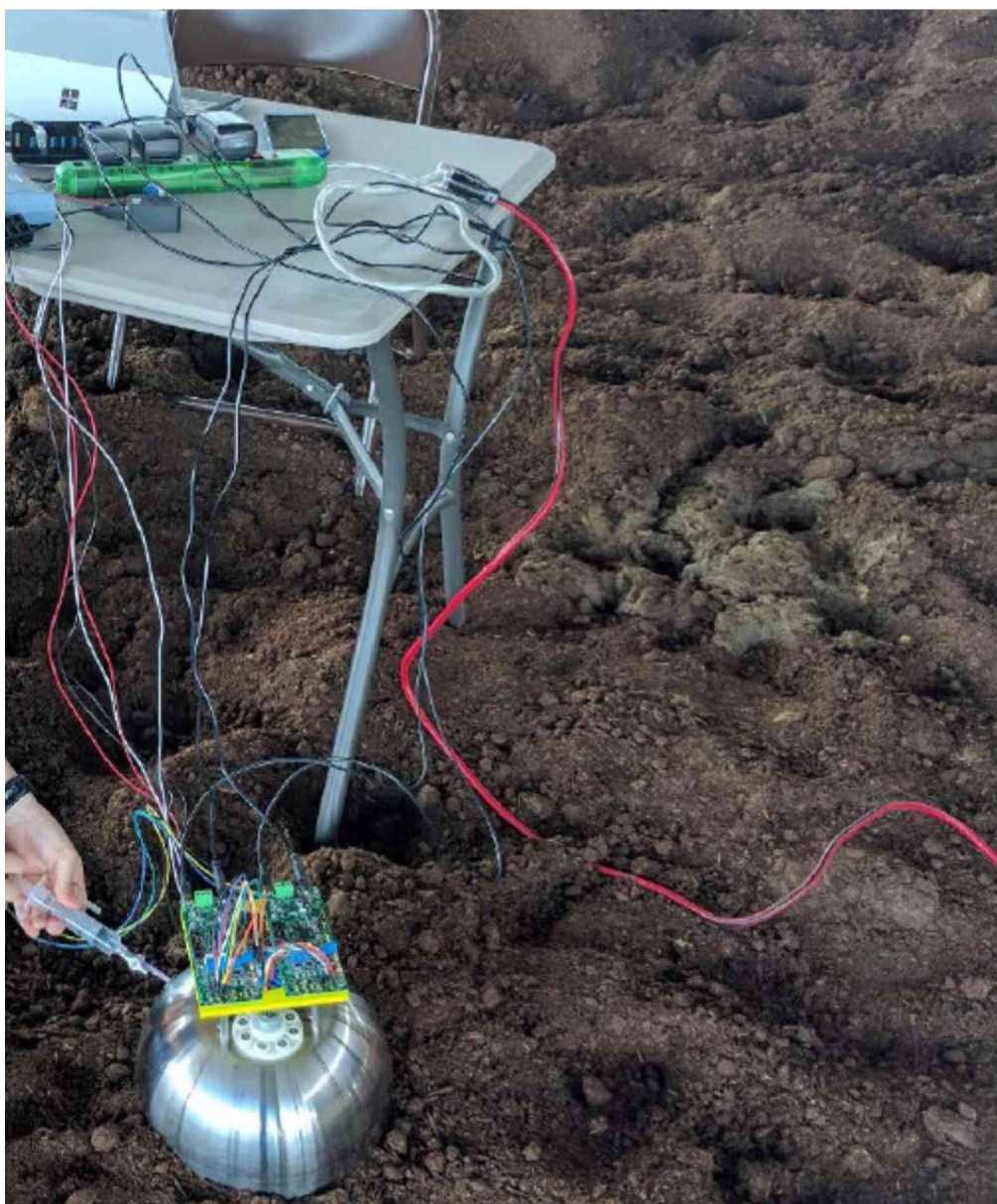


Рисунок 13. Установка для збору проб з компостної камери корівника

4.2. Обробка результатів експерименту

За кілька днів до розгортання в полі процес очищення камери повторювався при меншій швидкості потоку (приблизно 1 л/хв), щоб можна було порівняти відому концентрацію в камері з концентрацією, визначеною за допомогою ГХ-аналізу. Основна мета цього порівняння полягала в тому, щоб на практиці використовувати метод, який буде використовуватися в польових умовах. Зразки відбирали з перегородки в камері з інтервалом у 500 секунд, зберігали в шприцах із запірними кранами та доставляли до ґрунтознавчої лабораторії для аналізу. Було визначено, що точність знаходиться в межах 5%, оскільки вимірювання ГХ були високо повторюваними, спочатку використовували 3 ін'єкції для кожного зразка.

Однак у перших двох сеансах ГХ було виявлено проблему зі зберіганням зразків. Під час порівняння відомої кривої концентрації, створеної ІЧ-датчиком під час очищення камери, показання ГХ були низькими та суперечливими, що свідчить про дифузію з навколишнім повітрям. Це сталося, незважаючи на дотримання загальних рекомендацій і аналіз зразків негайно замість «безпечного» вікна в 48 годин. Проблему було вирішено після першого польового розгортання, знову з нижчими, ніж очікувалося, концентраціями, створеними ГХ. Методи зберігання були дещо змінені: запірний кран було замінено оригінальною голкою, а також пробкою на кінці після відбору зразка. Аналіз перших зразків після впровадження змін показав успіх; всі гази показали очікуване майже лінійне збільшення концентрації по відношенню до часу.

Однією з проблем, з якими зіткнувся датчик CO₂, була нездатність належним чином обробити рядок даних, виведених датчиком протягом короткого періоду часу. Ця проблема виникала кілька разів під час калібрування, але була непередбачуваною та рідкою. У польових умовах датчик спонтанно відновив правильний вихід із очікуваною концентрацією, щоб не спричинити значного компрометування даних. Для аналізу використовували ковзну 10-бальну середню концентрацію.

Перше розгортання відбулося 15 червня. Вимірювання відбувалося протягом 1 години з 20 куб. Пізніше аналіз показав, що запірний кран дозволяє дифузію навколишнього повітря в шприц, тому для подальшого розгортання

використовувалася гумова пробка. Форма вихідного сигналу ІЧ-датчика CO_2 показала, що через 25 хвилин концентрація CO_2 наближалася до асимптоти (рис. 14). Оскільки метод із закритою камерою вимагає лише початкового нахилу, майбутні розгортання обмежувалися 25 хвилинами. ІЧ-датчик CH_4 видавав суперечливі та переважно непридатні значення.

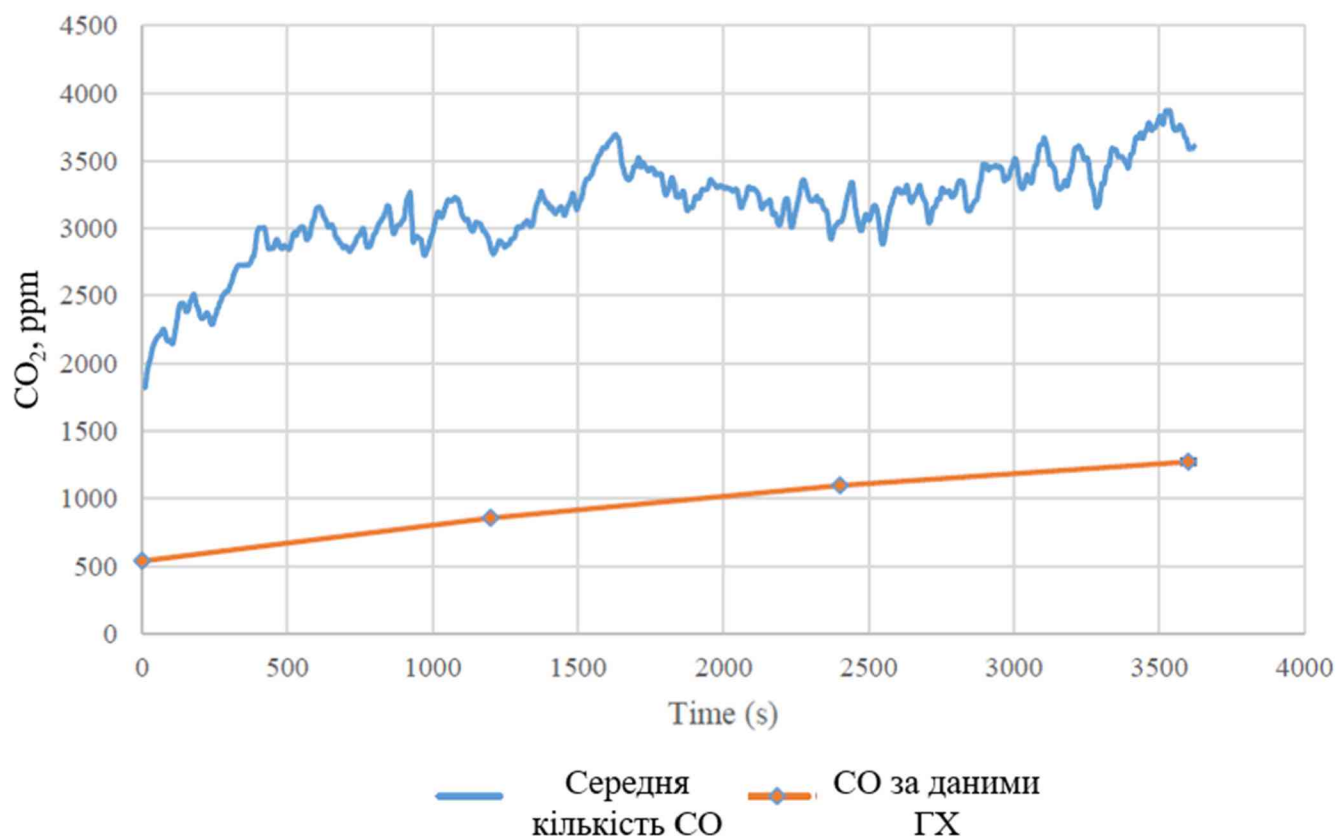


Рисунок 14. 15 червня ІЧ та ГХ вимірювання.

Розгортання 21 червня відбулося в дуже сухих умовах компосту відразу після обробки ґрунту. Було відібрано зразки для ГХ-аналізу CO_2 , CH_4 та N_2O . ІЧ-дані показали, що між першими двома точками зразка ГХ ($t = 0$ і $t = 500$ с) крива концентрації CO_2 може бути змодельована як лінійна. У цьому випадку використання методу 4-точкового аналізу та зважування до другого вимірювання створить штучно високий початковий нахил. Криві концентрації як за ГХ, так і за ІЧ показані на рис. 15

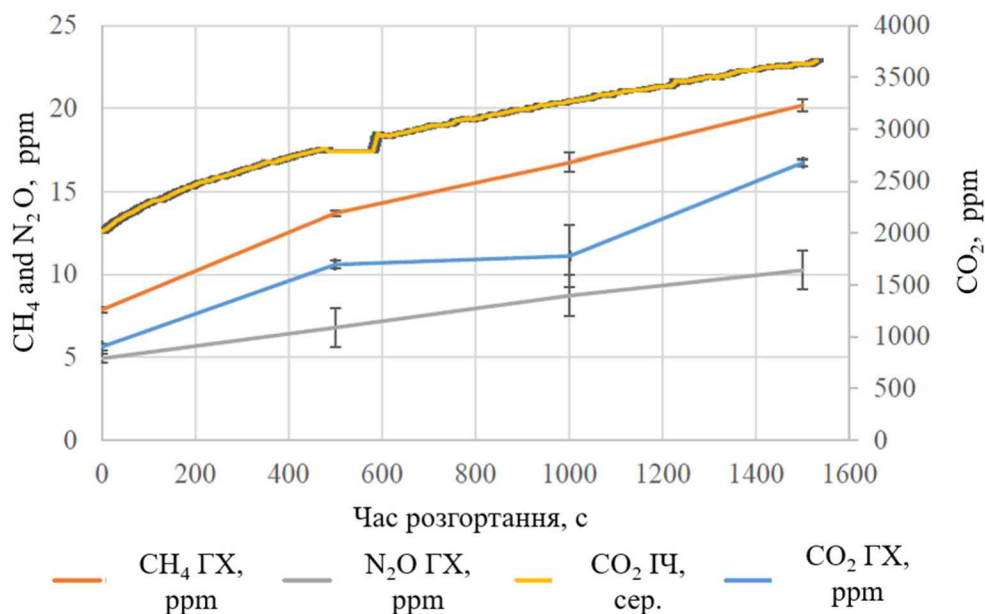


Рисунок 15. 21 червня ГЧ та ГХ вимірювання

Вимірювання 29 червня показали досить середній ВВ компосту. Відбулося три 25-хвилинні розгортання: одне безпосередньо перед обробкою ґрунту, одне через 5-30 хвилин після обробки ґрунту та одне через 35-60 хвилин після обробки ґрунту. Також було зібрано дані про концентрацію компосту в навколишньому середовищі на кількох футах вглиб основи корівника, на додаток до температури компосту в областях поблизу вимірювальної камери (табл. 3). Перед кожним розміщенням на поверхні компосту камері також дозволяли врівноважуватися з умовами навколишнього середовища, що призвело до зниження значень CO₂, які були ближчими до нормального атмосферного CO₂. Дані ГХ не збиралися. ГЧ-дані для CO₂ для всіх 3 розгортань були подібними за формою та значеннями (рис. 16).

Таблиця 3. Температура компосту (°C) поблизу точки вимірювання на різних глибинах.

Дата	Час відносно обробки ґрунту	Температура, поверхня	Температура, 10 см	Температура, 20 см
29.06	до	28.5	42.8	52.8
	30 хв після	28	45.6	46.9
	75 хв після	28.0	41.1	45.0
06.07	20 хв після	25.2	44.6	46.9
	60 хв після	25.0	47.0	48.5
	100 хв після	24.8	46.9	49.8

Конденсат був помітний на внутрішній стороні корпусу камери в кінці другого розгортання після обробки ґрунту через високу температуру поверхні камери. Очевидно, що підвищена вологість не вплинула на ІЧ-датчики (рис. 16).

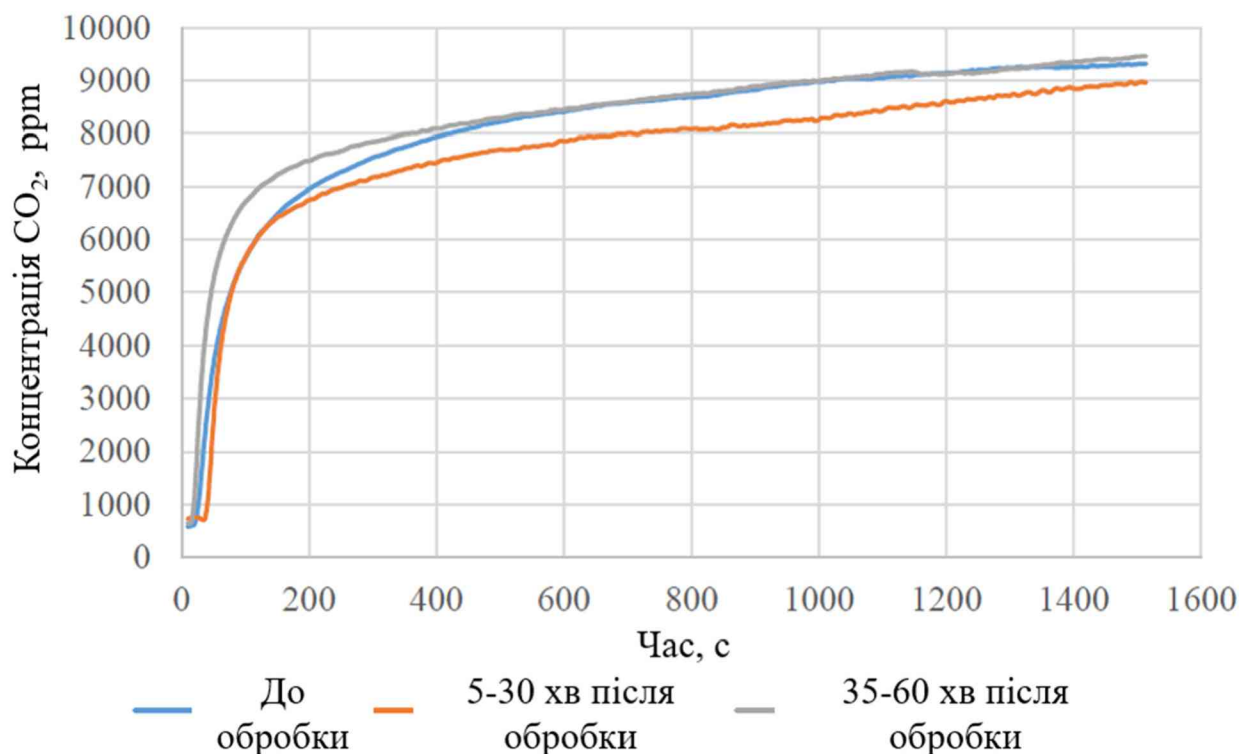


Рисунок 16. 29 червня дані CO_2 від інфрачервоного датчика

На рис. 17 представлені дані вимірів вологості.

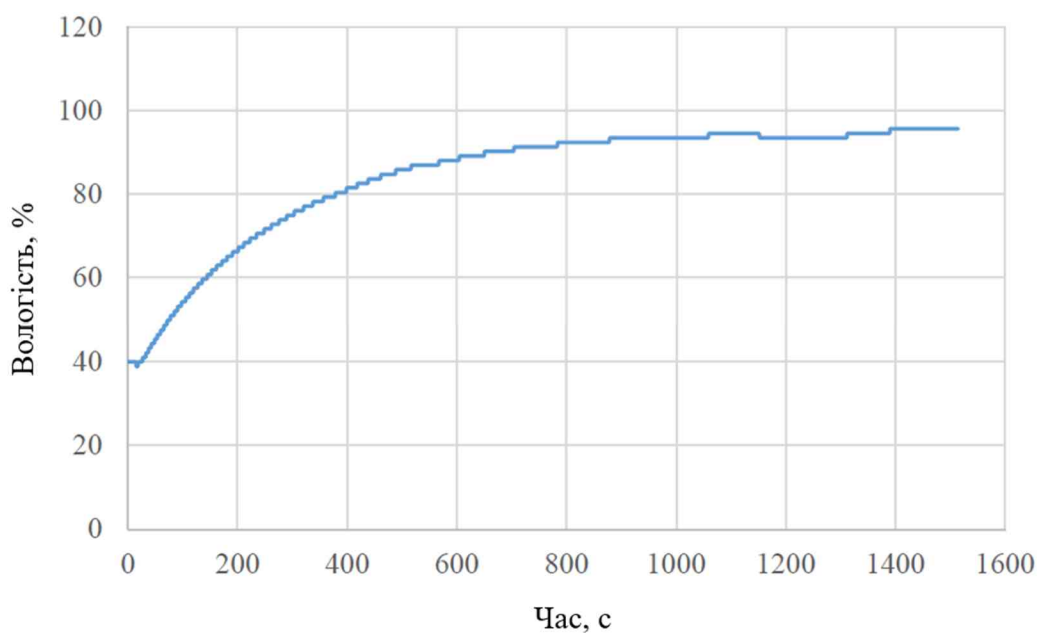


Рисунок 17. Наростання вологості у компостній камері

Вимірювання 6 липня мали 3 камери розгортання через 5-30, 35-60 і 65-90 хвилин після обробки ґрунту. Для CO_2 (рис. 18) і CH_4 (рис. 19) найбільші викиди

спостерігалися відразу після обробки ґрунту, а найменші – протягом 35-60 хвилин. Потік газу з шарів нижче шару ґрунту може сприяти збільшенню концентрації. Четверте розгортання після обробки ґрунту дало б краще уявлення про справжні тенденції виробництва газу по відношенню до часу обробки ґрунту.

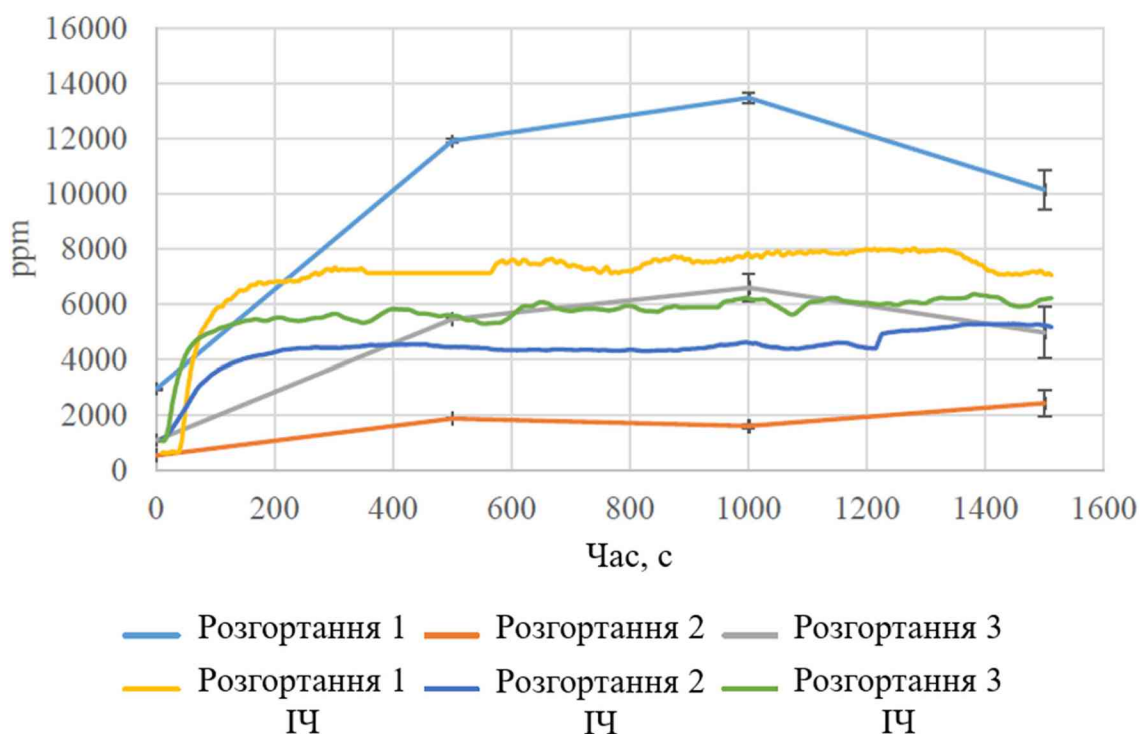


Рисунок 18. 6 липня CO₂ дані з ІЧ та ГХ, усі розгортання

Існує гіпотеза, що це результат перемішування газів із нижніх шарів компосту, стабілізація яких відбувається протягом 65-90 хвилин.

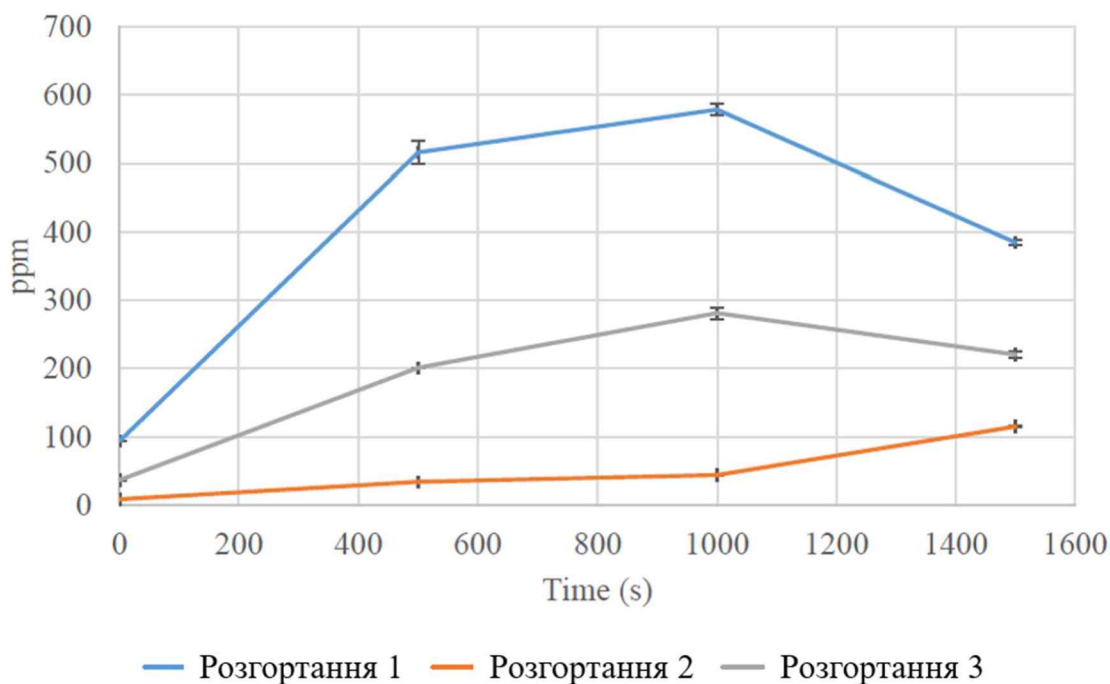


Рисунок 19. 6 липня CH₄ дані розгортань від ГХ

Потоки N_2O були невеликими, з початковими нахилами з періодів 35-60 і 65-90 хвилин, які не відрізнялися від нульового рівня (рис. 20).

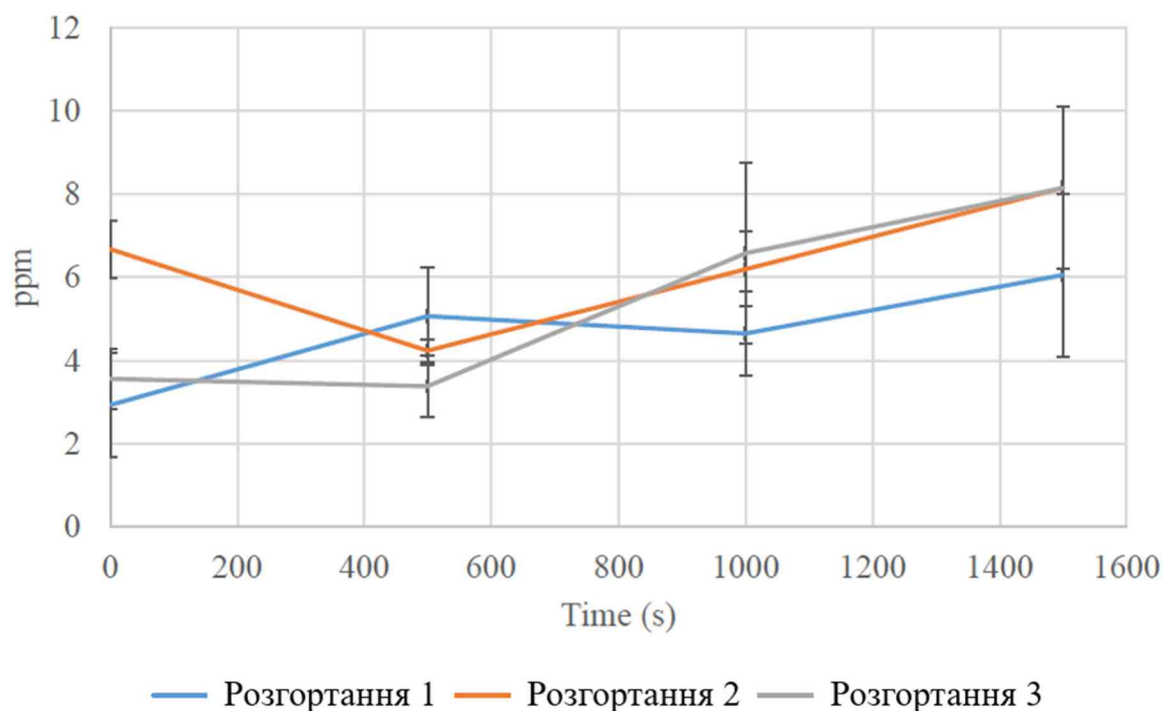


Рисунок 20. 6 липня N_2O дані розгортань від ГХ

Після збору даних наступним завданням було визначити, як аналізувати дані. Спочатку MATLAB використовувався для підгонки кривої регресії до ІЧ-даних і використання першого значення похідної підігнаної кривої ($f'(0)$) як початкової швидкості випромінювання. Дані відповідають очікуваній тенденції зменшення швидкості викидів з часом через зменшення градієнта концентрації між поверхневою концентрацією та концентрацією всередині камери. Однак, оскільки метод ГХ створює так мало точок, ту саму програму підгонки кривої не можна запустити. [38] пропонують алгоритм для визначення початкової швидкості викидів, використовуючи таку малу кількість точок; однак, формула сильно зважена на вищий показник, оскільки передбачається, що ущільнення камери не відбувається. Дані інфрачервоного датчика показали, що швидкість випромінювання наближається до асимптоти; таким чином, був досягнутий певний ступінь герметизації, і алгоритм, застосований до даних ІЧ-випромінювання, створив штучно високу швидкість випромінювання шляхом зважування до ранніх змін концентрації порівняно з підігнаною кривою MATLAB, яка використовувала більше точок.

Враховуючи ці проблеми та враховуючи порівняно короткий інтервал між відборами проб, було вирішено використовувати лише перші два показання ($t = 0$ і $t = 500$ секунд) і припустити лінійність для даних ГХ та ІЧ від 21 червня. Однак той самий метод, застосований до даних 29 червня та 6 липня, сильно занижує нахил, оскільки ІЧ-датчик продемонстрував вищі випромінювання та більш експоненціальну форму кривої. Обидва підкреслюють важливість отримання достатньої кількості точок даних для оцінки форми кривої перед застосуванням підгонки.

Можливо корисний метод підгонки кривої походить від [44]:

$$C(t) = (C_{equil} - C_0)(1 - e^{-kAt}) + C_0, \quad (12)$$

де C_{equil} – максимальна або рівноважна концентрація, C_0 – мінімальна або початкова концентрація, A – площа камери в м, t – час у секундах, k – коефіцієнт дифузії. Порівняння підігнаної кривої з чотирма «відомими» точками з GC дозволяє отримати k . Ця процедура дозволяє підганяти криву навіть з відносно невеликою кількістю точок.

Справжньому статистичному аналізу перешкодили численні фактори. По-перше, кожна поїздка вносила невеликі зміни в процедуру щодо зберігання, часу після обробки ґрунту та збору даних про навколишнє середовище. Крім того, через високу просторову та часову мінливість ККК статистичне порівняння нахилів між ГХ та ІЧ обмежене, оскільки для кожного набору умов можна отримати лише одне повторення. Однак просте порівняння окремих нахилів все ще може відбуватися для перевірки двох методів; початковий нахил для ГХ та ІЧ, інтервал прогнозу для датчика CO_2 та стандартне відхилення для виходу ГХ було використано для порівняння методів для даних 21 червня (табл. 4).

Таблиця 4. Порівняння початкових нахилів кривих потенційної концентрації, отриманих за допомогою ІЧ та ГХ (ppm/c) 21 червня

ГХ			ІЧ		
Мін.	Сер.	Макс.	Мін.	Сер.	Макс.
1.526	1.531	1.535	1.440	1.584	1.728

Загальні тенденції також можна спостерігати, пов'язані з обробіткою ґрунту та вмістом вологи в камері, що може бути корисним при розробці майбутніх схем відбору проб із використанням рівняння 12. Концентрації в Таблиці 4 були використані для визначення початкового нахилу що далі було перетворено в $\text{г м}^{-2} \text{год}^{-1}$ за допомогою закону ідеального газу. Отримані рівні виділення газів узагальнено в Таблиці 4.

Таблиця 4. Аналіз газу через ГХ 21 червня

Час	CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	Середнє, ppm	Станд. відх.	Середнє, ppm	Станд. відх.	Середнє, ppm	Станд. відх.
0	903	34	8	0.20	5	0.28
500	1695	38	14	0.16	7	1.17
1000	1778	303	17	0.55	9	1.24
1500	2681	33	20	0.36	10	1.16

У табл. 5 наведено підсумкові значення розрахунків швидкості виділення газів у корівниках з компостною камерою.

Таблиця 5. Підсумкові значення розрахунків швидкості виділення газів

Дата	Розгортання	CO ₂ , $\text{г м}^{-2} \text{год}^{-1}$	CH ₄ , $\text{г м}^{-2} \text{год}^{-1}$	N ₂ O, $\text{г м}^{-2} \text{год}^{-1}$
21.06 (ВВ 31%)	1	1.1	0.0029	0.0027
06.07 (ВВ 49%)	1	100.2	0.21	0.0031
06.07 (ВВ 49%)	2	24.1	0.013	—
06.07 (ВВ 49%)	3	26.4	0.082	—

4.3. Висновки за розділом

CO₂, N₂O та CH₄ були успішно виміряні в ККК. Датчик CO₂ порівнювався з показаннями концентрації, отриманими за допомогою ГХ, і хоча концентрації відрізнялися за абсолютними значеннями, нахил кривих концентрації не відрізнявся. Таким чином, ІЧ-датчик успішно виміряв CO₂ подібно до методу ГХ. Значення CH₄ і N₂O були достатньо високими, щоб їх можна було виміряти за допомогою ГХ; однак потік CH₄ був надто малим, щоб його можна було виявити за допомогою каліброваного ІЧ-сенсора протягом необхідного періоду вимірювання.

Не вдалося отримати датчик N_2O , але очікується подібний результат. Камера може успішно вимірювати CO_2 за допомогою ІЧ-випромінювання та дає змогу аналізувати сліди газу за допомогою ГХ. Нахили кривих концентрації підтверджують дані, оскільки вони вказують на відсутність витоків. Незважаючи на підвищену вологість і температуру в вимірювальній камері, вихідні дані датчика вказують на те, що високі значення не викликали жодних проблем з вимірюванням протягом 25-хвилинного періоду розгортання.

РОЗДІЛ V. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Охорона праці

Коли йдеться про здоров'я та безпеку, важливо знати різницю між небезпекою та ризиком? Небезпека визначається як будь-що, що може завдати шкоди, тоді як ризик – це можливість заподіяння шкоди цією небезпекою.

Відповідальна особа за стан охорони праці несе відповідальність за ефективне управління й усунення небезпек і ризиків на робочому місці. Працівники молочних ферм мають право на безпечне робоче місце, а також зобов'язані сприяти своєму здоров'ю та безпеці.

Молочні фермери стикаються з різними проблемами, коли мова йде про здоров'я та безпеку. Робітники часто мають справу з великими і часто непостійними молочними коровами. Також мова йде про використання ряду машин і обладнання для виконання роботи, а також про потребу ручного керування для виконання повсякденних завдань. Щоденні небезпеки також включають доступ до замкнутих приміщень, таких як силоси для кормів, контакт із різними хімічними речовинами як для чищення, так і для прийому ліків, а також контакт із захворюваннями, які можуть загрожувати життю.

Деякі з головних небезпек у світовій молочній промисловості включають: поводження з тваринами, замкнуті простори, хімікалії, зоонози, навколишнє середовище, включаючи вплив шуму, клімат і дорожній рух.

Молочне скотарство є небезпечною професією, незалежно від того, в якій країні ви працюєте. За 1 рік, з січня по грудень 2020 року, у Новій Зеландії зафіксовано 239 випадків травм, хвороб або серйозної шкоди в сільськогосподарській галузі. З них 147 стосувалися молочного скотарства. У тому ж році було підтверджено 10 смертельних випадків у молочному скотарстві, більшість з яких були працівниками, які потрапили в аварії, були заблоковані рухомими механізмами або мали контакт з електрикою.

За даними HSE, за 5 років з 2015/16 по 2019/20 16% смертельних травм у сільському господарстві були спричинені тваринами, 18 з цих 24 смертельних травм були спричинені великою рогатою худобою. Ще 28% були смертельно травмовані транспортними засобами. У молочній промисловості основними причинами травм

були ручне переміщення та підйом, удари предметами та падіння з висоти. У період з 2018 по 2019 рік було зафіксовано, що 39 людей втратили життя на фермі у Великій Британії, це збільшення порівняно зі статистичними даними попереднього року.

Молочний фермер і роботодавець, повинен забезпечити своїм працівникам безпечне робоче місце, здоров'я та безпеку підрядників, волонтерів, відвідувачів та інших осіб на робочому місці. Ось чому важливо, підтримувати робоче середовище зі зниженим або виключеним ризиком, в умовах, які запобігають травмам і хворобам. Для того, щоб керувати безпекою на молочних фермах і навколо них, система управління безпекою повинна допомагати підтримувати та контролювати наступні сфери.

Інструктаж і навчання. Коли ви представляєте нових працівників на свою молочну ферму, перше, що ви повинні зробити, це почати з введення в роботу. Ваш вступний процес має охоплювати низку тем, включаючи основну інформацію, структуру власності та очікування щодо роботи. На додаток до загального інструктажу, ви також повинні включити інструктаж з охорони праці. Ця інформація про здоров'я та безпеку повинна окреслювати політику та процедури на робочому місці, небезпеки та ризики, плани на випадок надзвичайних ситуацій, а також навчання та інструкції, що стосуються їх ролі.

Спілкування з підрядниками. У процесі управління ризиками комунікація є ключовою. У той час як ви покрили вступні курси для своїх працівників, не забудьте керувати своїми зобов'язаннями перед своїми Підрядниками. Залежно від сезону ви можете найняти Підрядників і Субпідрядників, щоб допомогти з додатковими роботами, такими як силос або огорожа. Коли ви наймаєте Підрядника, ви розподіляєте відповідальність за його здоров'я та безпеку на вашій території. Перш ніж ваш Підрядник прийде на вашу власність, він повинен знати, де розташовані ваші ставки для стічних вод, а також вашу політику щодо поводження з тваринами.

Облік. Ведення документації є проблемою для всіх галузей промисловості, але в молочній промисловості ви можете відчути, що ви перевантажені паперами. Ваша система управління безпекою має допомогти вам організувати ваші записи, гарантуючи їх актуальність і точність. Процес ведення записів має допомогти вам підтвердити, що ви виконуєте свої обов'язки щодо охорони здоров'я та безпеки, а

також надати вам огляд ефективності та забезпечити виконання вимог щодо страхування.

Записи повинні містити: Політику та процедури, Інструктаж, навчання та кваліфікація працівників, Реєстраційні документи на техніку, Деталі перевірки та обслуговування обладнання, Виявлення небезпеки та заходи контролю, Записи працівників, включаючи роботу та здоров'я. Залежно від розміру та характеру вашої молочної діяльності деякі записи є обов'язковими.

Політика та процедури. Надайте докази, коли вам це потрібно, що ви забезпечуєте безпечне робоче середовище за допомогою правил і процедур. Ваша політика має стосуватися обов'язків як працівників, так і керівництва з метою зменшення ризиків, пов'язаних із здоров'ям і безпекою. Фермери, які займаються молочним скотарством, повинні врахувати кілька правил, зокрема щодо експлуатації машин і обладнання, звітування про інциденти та небезпеки, а також переміщення худоби та роботи в замкнених просторах, таких як кормові силоси та ями.

Аварії та повідомлення про нещасні випадки. У більшості країн, де є регуляторний орган охорони здоров'я та безпеки, будуть встановлені правила щодо аварій та інцидентів, включаючи процес звітування та штрафи за недотримання правильного технологічного процесу.

Повідомлення про аварію або нещасний випадок слід розглядати як рішення та шанс покращити свою відданість здоров'ю та безпеці. Сильна культура звітності на робочому місці може сприяти кращому управлінню ризиками та уникненню серйозних інцидентів у майбутньому. Повідомлення про інциденти мають допомогти вашій молочній фермі усунути небезпеки до того, як щось станеться, заохочувати працівників до участі та відповідальності, допомагати вашій команді керівництва виконувати вимоги та забезпечувати захист у разі проведення розслідування. Інцидент може бути таким простим, як послизнення працівника на мокрій підлозі, або падіння чи травмування у корівнику. Це можна використати як можливість переглянути відповідне взуття на робочому місці або подивитися на дренажні та побутові процеси.

Управління при надзвичайних ситуація. Чи знають ваші працівники, до кого звертатися в разі надзвичайної ситуації, чи можете ви повідомити своїх працівників у надзвичайній ситуації, наприклад, під час пожежі на сні? Ваша система управління безпекою має бути безпечним місцем для зберігання цієї інформації, забезпечуючи вашим працівникам доступ, коли вона їм найбільше потрібна. Як частину вашої належної практики охорони здоров'я та безпеки, вам потрібно задокументувати процедури надзвичайних ситуацій. У ньому мають бути детально описані плани евакуації, ім'я та контактна інформація для першої допомоги та екстрених служб, протипожежної безпеки та процедур біозахисту.

Як завжди, якщо ви не впевнені щодо законодавчих вимог вашої країни, найкраще зверніться до місцевого регулятора.

У молочному скотарстві є свої проблеми, тому модернізацію слід адаптувати до галузі. Використовуючи програму Safe Ag Systems, ви можете надіслати ввідну інформацію безпосередньо своїм працівникам і підрядникам до їх прибуття на місце. Виконуйте свої зобов'язання та повідомляйте про свої вимоги безпеки, відстежуйте, хто пройшов вступний курс і кого вам потрібно спостерігати.

Перевірки та контрольні списки. Частиною вашого процесу управління ризиками є визначення потенційних небезпек до того, як вони стануть небезпекою для ваших працівників. Інспекція молочної ферми допоможе вам вирішити питання добробуту тварин, біозахисту, безпечного та відповідального поводження з тваринами, а також визначити небезпеки на дворах для худоби.

Працюючи на молочній фермі, існує ряд ризиків і небезпек, пов'язаних із повсякденними завданнями, пов'язаними з машинами та обладнанням, поводженням з тваринами та використанням хімікатів. Впровадьте систему безпеки, яка допоможе вам ідентифікувати ці ризики та небезпеки та керувати ними за допомогою чіткої комунікації та ведення записів.

Здоров'я та безпека є вимогою законодавства. Усі підприємства, включно з молочними фермами, повинні мати програму охорони праці, щоб запобігти травматизму та захворюванням на виробництві. Програми охорони здоров'я та безпеки повинні відповідати певним стандартам, залежно від кількості працівників

на робочому місці, і ви повинні проявляти належну обачність, вживаючи заходів для відповідності цим стандартам.

Роботодавцям із менш ніж 20 працівниками потрібна менш формальна програма, яка ґрунтується на регулярних щомісячних зустрічах із працівниками для обговорення питань охорони здоров'я та безпеки. Роботодавці повинні зробити наступне:

- Переконайтеся, що зустрічі зосереджені на виправленні небезпечних умов і практик, а здоров'я та безпека стануть пріоритетом на робочому місці.
- Ведіть записи про зустрічі, відвідувачів і обговорювані теми.
- Переконайтеся, що працівники отримують орієнтацію, а також постійне навчання, навчання та нагляд. Працівники повинні отримувати всю необхідну інформацію для безпечної роботи.

Деякі завдання з високим ризиком вимагають письмових процедур безпечної роботи, які працівники можуть використовувати для усунення або мінімізації ризиків. Письмова процедура безпечної роботи забезпечує працівників поетапним підходом, який враховує завдання, які є специфічними для виконуваної роботи. Як власник або роботодавець, ви несете відповідальність за те, щоб працівники були навчені процедурам безпечної роботи та щоб вони розуміли їх навчання.

Також важливо забезпечити постійний нагляд і моніторинг працівників, щоб переконатися, що вони дотримуються процедур і працюють відповідно до свого навчання. Зі свого боку працівники несуть відповідальність за дотримання правил безпечної праці. Керівники та менеджери знайдуть безпечні робочі процедури корисними для навчання працівників.

У багатьох випадках Положення визначає типи завдань, які потребують процедур. У молочній промисловості це, ймовірно, включає першу допомогу, блокування, процедури перевірки персоналу для роботи поодиночці, вхід у замкнений простір, а також екстрене порятунк та евакуацію.

Загалом, процедури безпечної роботи написані для: Завдання підвищеного ризику, визначені Положенням; Складні завдання, тому важливі кроки не пропустіть; Часто виконувані завдання; Деякі менш рутинні завдання, щоб нагадати працівникам про ризики та /як контролювати ризики.

5.2 Екологічна експертиза

Травоядні тварини з екологічної точки зору є важливою складовою глобальної продовольчої безпеки, так як здатні до перероблення неїстівного біологічного матеріалу, що є важливою перевагою, при порівнянні ефективності з іншими видами забезпечення продовольства. Таким чином запропоновані тут технологічні рішення працюють на збалансування продовольчої безпеки та зміни клімату, що часто є конкуруючими викликами. Молочна промисловість України працює над покращенням екологічних показників ланцюга постачання таким чином, щоб відповідати принципам сталого розвитку та максимально ефективного використання енергії та біологічного матеріалу.

Загальний фокус роботи полягає в тому, що пріоритет знаходиться у скороченні викидів молочних продуктів і спрямований на підвищення ефективності роботи корівників.

На додаток до оптимізації середовища для корів, зберігання гною є очевидним пунктом контролю викидів. Метанові реактори стали ще одним варіантом, який все частіше досліджується. Температура впливає на профіль газових викидів анаеробного варочного котла, причому вища температура призводить до вищих викидів метану. Метанові реактори також мали високий рівень вилучення амонію. У цій роботі представлено менш вартісний аналог їх встановлення при чому він відносно практичний для невеликих ферм.

Підвищення ефективності в системах тваринництва дозволяє робити вибір механізації та системи утримання худоби, який призведе до зменшення викидів парникових газів. Застосування запропонованого у цій роботі пристрою дозволить підвищити ефективність виробництва молока з одночасним скороченням викиду парникових газів – два фактори, які на практиці завжди знаходяться у зворотній пропорційному зв'язку.

5.3. Економічна ефективність

Для забезпечення коректності зіставлення та об'єктивності прийняття рішення щодо доцільності проектів, використовуються єдині принципи оцінки економічної ефективності.

Річна економія с/г підприємства від запровадження пристрою для контролю емісії газів компостною камерою приводить до поліпшення умов праці на підприємстві складається з:

- економії за рахунок зменшення професійної захворюваності та/або випадків травматизму (заробітна плата, пониження собівартості продукції, фінанси на виплати щодо тимчасової непрацездатності);
- економії від зниження текучості кадрів (за рахунок зменшення собівартості продукції, збільшення прибутку та на витратах на підготовку кадрів);
- економії від зменшення витрат на пільги, компенсації за роботу в несприятливих умовах тощо (за рахунок заробітної плати, витрат на профілактичне харчування, безкоштовне одержання молока чи інших харчових продуктів).

Економічне обґрунтування запровадження покращених технологій функціонування корівників з компостними камерами здійснюється в такому порядку:

- спочатку визначається набір заходів, покликаних ефективно ввести новий елемент у існуючу технологію, на основі визначених соціальних показників за базовим і впроваджуваним варіантами:

- визначаються витрати на переобладнання робочих місць;
- розраховується економічно-соціальна ефективність прийнятих рішень;
- визначається економічний ефект від потенційного здійснення запропонованих заходів.

Оцінка економічної ефективності проекту проводиться на основі чистого грошового потоку від операційної та інвестиційної діяльності (різниця між надходженнями і платежами), скоригованого на податкові відрахування. Грошові потоки від фінансової діяльності (за винятком нарахованих відсотків), які пов'язані з реалізацією проекту, не враховуються під час формування чистого грошового потоку, але податок на прибуток розраховується з урахуванням вартості фінансування проекту (з урахуванням відсотків).

Із врахуванням чисельності персоналу та підвищення продуктивності роботи ККК, економічний ефект від впровадження запропонованого пристрою контролю виділення газів складатиме в середньому 200 тис. грн на рік.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Було успішно розроблено камеру для вимірювання викидів спеціально для ККК за нижчою ціною, ніж зазвичай використовувані системи вимірювання викидів худоби. Швидкість викидів CO_2 можна легко виміряти з такою ж точністю, як ГХ, і навіть з більшою точністю. Рівень викидів CH_4 та N_2O визначався лише за допомогою ГХ; Потоки CH_4 були надто низькими, щоб їх можна було виявити наявними інфрачервоними датчиками, і хоча датчик N_2O отримати не вдалося, очікується, що результат буде подібним. Через непостійне початкове значення навіть у процесі калібрування датчик NH_3 було визнано ненадійним для цього дослідження.

Проблеми зі зберіганням зразків, які виникають під час аналізу ГХ, підкреслюють важливість частого тестування методів зберігання зразків, що сприяє вищим вимогам до праці традиційних вимірювальних систем ГХ. Крім того, розрахований рівень викидів сильно залежить від методу аналізу нахилу. Ручний відбір проб для ГХ-аналізу дає кілька точок і, отже, більшу невизначеність справжньої кривої концентрації, з якої можна зробити висновок про початкову швидкість викидів. Точна крива CO_2 , отримана за допомогою ІЧ-датчика, надала вказівки щодо справжнього типу кривої, що також допомогло у виборі відповідного методу аналізу для інших газів. Важливість надмірної вибірки неможливо переоцінити, оскільки вона може дозволити менш дорогим методам отримувати дані порівнянної або навіть більшої цінності, ніж традиційні системи, особливо тому, що нижча вартість дозволяє розгортати більше камер, щоб також фіксувати просторові варіації всередині такої гетерогенної системи. як СВР.

корпус для оцінки слідів газів за допомогою більш традиційного методу ГХ. Крім того, вимірювання вологості та температури в камері може надати додаткову інформацію про продуктивність ліжка. Швидкість висихання шару або швидкість випаровування вологи можна розрахувати за цими вимірюваннями навколишнього середовища. Це важливе значення для оцінки необхідної площі для відпочинку компосту на корову для контролю вологості компостної грядки та бажаної площі для відпочинку компостної корівниці, необхідної для розмірів корівника.

Хоча лише CO_2 можна впевнено виміряти лише ІЧ-датчиком, розроблена гібридна камера була б корисною для автоматизованих вимірювань аеробного дихання ККК і, таким чином, продуктивності компостної камери шляхом оцінки швидкості мікробного розпаду матеріалів; крім того, вимірювальна камера забезпечує відносно недорогий корпус для оцінки слідів газів за допомогою більш традиційного методу ГХ. Крім того, вимірювання вологості та температури в камері може надати додаткову інформацію про продуктивність підстиляючого шару. Швидкість висихання шару або швидкість випаровування вологи можна розрахувати за цими вимірюваннями навколишнього середовища. Це важливе значення для оцінки необхідної площі для відпочинку на корову та для контролю вологості компостної камери.

Відразу очевидні два майбутніх кроки дослідження. По-перше, це розгортання кількох камер у ККК для фіксації просторових змін у системі. Раніше це було обмежено вартістю камери; однак розроблена дешева камера дозволяє розгортати багато камер за такою ж ціною, як одна велика традиційна камера. Проблемою буде одночасний запуск усіх камер, оскільки концентрація газу накопичується надзвичайно швидко, і лише кілька хвилин налаштування можуть призвести до очевидно значних відмінностей у викидах; однак це, ймовірно, можна виправити за допомогою математичного моделювання, оскільки має значення лише початковий нахил експериментальних кривих концентрації.

Подальшого дослідження заслуговує питання порівняння методів зберігання гною. Викиди N_2O від ККК є значними, незважаючи на переважно аеробний поверхневий шар, ймовірно, через поєднану нітрифікацію та денітрифікацію, як обговорювалося в Розділі 1. Однак потрібно провести порівняння між методами зберігання гною, перш ніж робити висновки про вплив ККК на навколишнє середовище. Подібним чином, некишковий CH_4 інтуїтивно був би нижчим, але фактичне порівняння має відбутися.

Вимірювання викидів, знайдені в цьому дослідженні, мають той самий порядок величини, що й попередні дослідження. Ці результати підтверджують метод, розроблений у рамках цього проекту, і пропонують потенціал для використання розробленої камери та методів у більш детальній схемі відбору проб

з подальшим розвитком порівняння викидів. Висока просторова та часова мінливість повинна стимулювати ретельне документування умов випробування, включаючи вміст вологи, вологість, температуру та час у зв'язку з обробіткою ґрунту. Через такі значні варіації умов рівень викидів не можна безпосередньо порівнювати незалежно; Дослідники повинні бути творчими у своєму експериментальному плані, щоб охопити різноманітні умови та, можливо, розробити моделі для врахування виділених змінних.