

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра механіки та
інженерії агроєкосистем

Кваліфікаційна робота

БОНДАР Тарас Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

УДК 662. 767. 2

(індекс)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Обґрунтування параметрів обладнання для виробництва біогазу
шляхом анаеробного зброджування органічної сировини**

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Т.О. БОНДАР

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Н.М. ЦИВЕНКОВА

(прізвище, ім'я, по батькові)

ДОЦЕНТ КАНД. ТЕХ. НАУК

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

БОНДАР Т.О. Обґрунтування параметрів обладнання для виробництва біогазу шляхом анаеробного зброджування органічної сировини.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В роботі виконано аналіз теоретичних положень та результатів експериментальних досліджень процесу анаеробного зброджування біосировини в обертових реакторах та встановлено параметри, які впливають на ефективність процесу. Встановлено характер закономірностей, які дозволять оптимізувати параметри технічних засобів для розкладання субстратів з біосировини.

Методом проведення багатофакторного експерименту встановлено залежність об'єму виробленого біогазу від кількості сухої речовини в субстраті, потужності приводного двигуна та температури процесу зброджування. Доведено високу ступінь відповідності математичної моделі експериментальним дослідженням.

Ключові слова: біосировина, біореактор, зброджування, анаеробний процес, біогумус.

SUMMARY

BONDAR T.O. Substantiation of equipment parameters for biogas production by anaerobic fermentation of organic raw materials.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agroengineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The analysis of theoretical positions and results of experimental researches of process of anaerobic fermentation of bioraw materials in rotating reactors is carried out and the parameters influencing efficiency of process are established. The character of regularities which will allow to optimize parameters of technical means for decomposition of substrates from bioraw materials is established.

The dependence of the volume of biogas produced on the amount of dry matter in the substrate, the power of the drive motor and the temperature of the fermentation process was determined by the method of conducting a multifactor experiment.

A high degree of the mathematical model conformity to experimental research has been proved.

Key words: bio raw materials, bioreactor, fermentation, anaerobic process, biohumus.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ АНАЕРОБНОГО РОЗКЛАДАННЯ БІОСИРОВИНИ.....	6
1.1. Особливості біомаси, що використовується як сировина	6
1.2. Сучасний стан розвитку технології анаеробного розкладання біосировини в біореакторах.....	7
1.3. Перспективні напрямки удосконалення процесу анаеробного розкладання сировини з виділенням біогазу..	8
1.4. Висновки до розділу 1	11
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ БІОСИРОВИНИ.....	12
2.1. Порівняння та систематизація існуючих конструкцій обладнання для анаеробного зброджування органічних залишків.....	12
2.2. Моделювання процесу анаеробного розкладання біосировини в реакторі з виробництва біогазу.....	14
2.3. Моделювання потужності змішування компонентів субстрату в реакторі з виробництва біогазу.....	19
2.4. Висновки до розділу 2.....	21
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ БІОСИРОВИНИ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ПО БІОГАЗУ ТА БІОДОБРИВУ.....	22
3.1. Методика експериментального дослідження.....	22
3.2. Методика визначення сухої частки субстрату.....	24
3.3. Методика проведення багатофакторного експерименту....	25
3.4. Експериментальні результати дослідження продуктивності установки по біогазу.....	26
3.5. Висновки до розділу 3.....	32
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасні вимоги до виробництва сільськогосподарської продукції постійно підвищуються в напрямку екологізації процесів, збільшення частки органічних добрив та виробництва «чистої» енергії. Постійно зростаючі ціни на енергоносії підвищують актуальність виробництва біогазу з власної сировинної бази.

Через високий інтерес до теми за останні роки збільшилась кількість досліджень щодо анаеробної переробки біологічних залишків рослинного та тваринного походження на горючий газ в установках різного типу. Однак, дане питання все ще потребує проведення глибокого аналітичного та експериментального вивчення.

Аналіз наукових праць щодо питань вивчення процесу виробництва біогазу з біосировини свідчить, що значна кількість досліджень відображає вплив діяльності мікроорганізмів на якісні та кількісні показники виробленого газу. Роботи, які містять результати досліджень з впливу конструкційно-технологічних параметрів на ефективність процесу виробництва біогазу, переважно, висвітлюють температурні та аераційні режими процесу залежно від певного виду біосировини. Значна кількість досліджень носить виключно практичний характер, без занурення в математичний опис процесу. Це відкриває перспективи для досліджень, яким присвячена дана робота.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи – визначити теоретичним та дослідним шляхами набір регульованих параметрів, які впливають на продуктивність установки за біогазом, встановити оптимальні значення цих параметрів для комплексної максимізації кінцевого продукту процесу.

Об'єкт дослідження – закономірності впливу режимів роботи та параметрів установки анаеробного розкладання біосировини на ефективність виробництва біогазу.

Предметом дослідження процес анаеробного розкладання біосировини в реакторах з горизонтальною віссю обертання для виробництва біогазу.

В процесі виконання роботи були використані такі *методи досліджень*, як вивчення напрацювань попередників в даному напрямку (теоретико-аналітичний), математичного моделювання для створення теоретичної бази експерименту, експериментальний – для підтвердження математичної моделі фактичними результатами, статистичний – для планування схеми експерименту та обробки результатів експерименту.

Для досягнення мети роботи поставлені та виконані наступні **завдання**:

1. Дослідити сучасні теоретичні та експериментальні напрацювання українських та світових вчених, визначити їх сильні та слабкі сторони;
2. Виконати математичний опис процесу анаеробного розкладання біосировини в установках з горизонтальною віссю та встановити вплив параметрів установки на кількість виробленого біогазу;
3. Підтвердити відповідність реальному процесу теоретичної моделі шляхом проведення натурного експерименту та встановити оптимальні режими такого процесу для максимізації продуктивності установки.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Результати магістерської кваліфікаційної роботи надруковано в: збірнику тез науково-практичної конференції I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей, яка мала місце 18 січня 2021 р; збірнику матеріалів науково-практичної конференції НПП, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2021, яка проходила 15 листопада 2021 року; збірнику матеріалів V міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи», яка проходила 27-28 травня 2021 року в Поліському національному університеті.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота містить вступ, три розділи, кожен з яких включає підрозділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних літературних джерел з 38 найменувань, додатки. Загальний обсяг роботи становить 33 арк.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ АНАЕРОБНОГО РОЗКЛАДАННЯ БІОСИРОВИНИ

1.1. Особливості біомаси, що використовується як сировина

Сучасне сільське господарство, яке робить акцент на енергоефективності та використанні власного енергетичного потенціалу для забезпечення енергетичних потреб, потребує ретельного енергоаудиту, в тому числі і в розрізі планових змін в структурі посівних площ або в структурі поголів'я сільськогосподарських тварин чи птахів [4].

Кожен з видів біомаси має свій хімічний склад, який дозволяє з різним рівнем ефективності виробляти біогаз чи переробляти біомасу у добриво. Для деяких біологічних залишків сьогодні вже існують дослідження найкращих пропорцій сумішей біомаси різного походження, для якої виробництво біогазу має найвищу продуктивність [2].

Проведені дослідження дозволяють прогнозувати обсяги біогазу, що можна отримати з ресурсів, виявлених під час енергоаудиту. Але на сьогоднішній день дана інформація структурована та згрупована по окремим напрямкам залишків, а узагальненої інформаційної бази не створено [11].

В представленій магістерській роботі проведено широке дослідження потенціалу біосировини по виробництву біогазу в розрізі різноманітності форм біоорганічних відходів. Результати представлені в додатку Д і додатку Е.

Результати досліджень дозволяють з достатньою для прогнозування точністю встановити рівень енергетичного потенціалу власної біомаси по біогазу, але для більш точного налаштування процесу потрібні додаткові дослідження біосировини, оскільки склад органічних залишків залежить від багатьох факторів. Так, наприклад, склад рослинної біомаси може відрізнятись від сорту культури, якості ґрунтів та методу вирощування, рослин-попередників тощо. Для біозалишків тваринництва та птахівництва значення мають вид тварин чи птахів, порода, спосіб утримання, склад харчування і

багато інших факторів. Тому результати, представлені в додатках даної роботи можна використати для оцінки потенціалу, але не для пошуку оптимальних режимів [13]. Точність та відтворюваність експерименту буде залежати від однорідності і визначеності складу сировини.

1.2. Сучасний стан розвитку технології анаеробного розкладання біосировини в біореакторах

Однією з перспективних технологій відновлюваної енергетики сьогодення є біогазові технології, які задовольняють як потреби людства в енергії, так і вирішують екологічні питання (додаток 3) [3, 17]. Біогаз утворюється шляхом анаеробного розкладання різними мікроорганізмами субстрату (органічної сировини) і є сумішшю таких компонентів, як CH_4 (48...74%) та CO_2 (26...52%). Також біогаз, в незначній кількості, містить водень, аміак, сірку тощо залежно від технології виробництва біогазу та від фізико-хімічних властивостей вихідного субстрату (сировини) [15, 21].

Експлуатація біогазових реакторів пов'язана з наступними позитивними факторами [21–24]:

- 1) Виробництво біогазу запобігає викидам в атмосферу метану.
- 2) Експлуатація біогазових установок покращує санітарно-гігієнічні показники заводів, фабрик та ферм, оскільки зазначені установки можуть виступати в якості очисних споруд на даних промислових об'єктах.
- 3) Субстрат, перероблений в реакторі з виробництва біогазу, є цінним добривом, яке містить калій, фосфор, азот та поживні мікроелементи.
- 4) Біогаз, після збагачення та видалення зайвої вологи, може використовуватися як паливо для двигунів внутрішнього згорання транспортних засобів, спалюватися в пальниках теплотехнічного обладнання з метою виробництва теплоти тощо.
- 5) Вироблена теплота може також використовуватися для власних потреб реакторів з виробництва біогазу, а також в системах тепло забезпечення.

б) Біогаз може використовуватися як паливо для роботи теплоелектростанцій блокового типу.

Практичне застосування технології виробництва горючого біогазу в реакторах пов'язане з вирішенням багатьох складних питань, на зразок технічного та хіміко-біологічного напрямків, а також питань логістики використання виробленої енергії та постачання біосировини [27, 28, 31].

Розвиток біогазових технологій. Якщо мова йде про біогазові технології, то вони отримали широкий розвиток в Бразилії, Китаї, США, Європі та інших країнах [1, 4–6]. На початку 2020 року за даними Європейської Біогазової Асоціації в ЄС нараховувалось близько 28412 установок з виробництва біогазу, які упродовж року виробили таку кількість біогазу, яка при спалюванні забезпечила виробництво 75,3 ТВт·год. електричної енергії. Вказана кількість виробленої електричної енергії була достатньою для забезпечення 16 млн. домогосподарств [2].

Виробництво світового біогазу, за науковими дослідженнями Pike Research, до 2025 року складе, в перерахунку на теплову енергію, 509 ТВт·год.

Відповідно до даних Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України станом на 2020 рік в країні функціонувало 49 біогазових установок загальною встановленою електричною потужністю 86 МВт [20]. Із зазначених установок електрична потужність переважної більшості з них не перевищує 2 МВт. Це дозволяє успішно вирішувати завдання їх більш ефективної експлуатації, зокрема здійснення безперервного забезпечення біосировиною з відходів тваринництва. З цих установок 11 працює на газу, виробленому з відходів звалищ [14, 16].

1.3. Перспективні напрямки удосконалення процесу анаеробного розкладання сировини з виробництва біогазу

Класифікація факторів оптимізації процесу анаеробного розкладання представлена в додатку Е. З метою ефективної експлуатації установок з виробництва біогазу потрібно вирішити перелік завдань різноманітного

характеру.

1. Ще на початковому етапі проектування установки з виробництва біогазу слід виконати аналіз сировинної бази для забезпечення безперебійного цілорічного постачання сировини для виготовлення субстратів. Витрати на транспортування повинні бути мінімальними щоб підвищити рентабельність установки в цілому. Раціональним є встановлення установки з виробництва біогазу безпосередньо біля підприємства з виробництва субстрату (наприклад біля звалищ твердих побутових відходів або тваринницьких ферм чи аграрних підприємств, які спеціалізуються на рослинництві) [25, 26, 32].

2. Слід забезпечити бактеріям, які беруть участь в процесі анаеробної ферментації біосировини і виробництві біогазу, певні визначені умови життєдіяльності, оскільки в іншому випадку процес виробництва біогазу сповільнюється, або взагалі зупиняється. Температура оточуючого середовища в діапазоні від 37 до 42°C є оптимальною для більшості метанотворних мікроорганізмів [28]. Оптимальним є діапазон кислотності біосировини в межах pH 6,5...8 [33]. Різні мікроорганізми, які беруть участь в утворенні метану, потребують різних поживних речовин, вітамінів та мікроелементів. Доступність та наявність останніх суттєво впливає на ріст популяцій мікроорганізмів. До найважливіших поживних речовин відносяться азот, вуглець, сірка, фосфор. На практиці в установці з виробництва біогазу відношення вуглецю:азоту:фосфору:сірки складає 605:22:5:3 [34, 35]. На виробництво біогазу і життєвий цикл бактерій, в свою чергу, негативно впливають інгібітори (шкідливі речовини) [30].

3. Вибір оптимального об'єму реактора та відповідного робочого обладнання. Проектувати реактор з виробництва біогазу слід таким чином, щоб він був здатний вмістити потрібну кількість субстрату. Також повинна забезпечуватися умова, що при поточному безперервному надходженні вхідного субстрату з одночасним вивантаженням шламу не повинно вимиватися мікроорганізмів більше, ніж за цей час може вирости [29]. Залежно від вихідного субстрату, реактор з виробництва біогазу може оснащуватися:

газгольдерами для зберігання біогазу; системами видалення відпрацьованого субстрату та осаду; різної конструкції змішувачами для змішування субстрату в реакторі; ємністю для знезараження; насосами та завантажувальними пристроями для подачі в реактор субстрату; шредерами та ножами для подрібнення субстрату. Зазначені вузли конструкції повинні бути простими у виготовленні, обслуговуванні та експлуатації, споживати мінімальну кількість електричної енергії тощо. Реактор повинен мати мінімальні втрати теплоти завдяки гарній теплоізоляції [19, 28, 29].

4. Завдання, пов'язані із зберіганням залишків анаеробної ферментації. Рідкі залишки анаеробної ферментації слід зберігати в ємностях зі сталі чи бетону, оснащені мішалками. Також ці ємності покривають плівками, які перешкоджають виділенню неприємного запаху та збирають залишковий біогаз. Розмір ємності для зберігання рідких відходів ферментації розраховується на об'єм переробленого субстрату, який виділяється не менш ніж за 180 днів експлуатації реактора. З метою зменшення потрапляння осадів з атмосфери тверді залишки ферментації накриваються спеціальними тентами та складаються на водонепроникних ділянках [19].

5. Використання енергії шляхом спалювання біогазу на теплоелектроцентралях блочного типу. Часто спостерігається явище надходження в атмосферу теплової енергії, яка виділяється під час спалювання біогазу. Корисне використання зазначеної енергії підвищить економічну ефективність установок з виробництва біогазу [18].

6. Підготовка до подальшого використання біогазу. Пряме використання виробленого в установці біогазу є неможливим через вміст різних домішок та вологи, тому біогаз очищується та збагачується різними методами. Для використання біогазу на теплоелектроцентралях блочного типу достатньо здійснити процеси сушіння та усунення сірки. Проте, якщо біогаз буде надходити в мережі природного газу, слід виконати ще ряд заходів: створення надлишкового тиску, зміну калорійності, одорювання, усунення кисню, толуолу, бензолу та інших залишкових газів, сепарацію вуглекислого газу.

1.4. Висновки до розділу 1

Україна має потужний потенціал для розвитку біогазових технологій, а комплексне використання методів підвищення їх ефективності, поряд з організацією виробництва вітчизняного обладнання, зробить використання установок з виробництва біогазу більш економічним.

Результати досліджень дозволяють з достатньою для прогнозу точністю встановити рівень енергетичного потенціалу власної біомаси по біогазу, але для більш точного налаштування процесу потрібні додаткові дослідження біосировини, оскільки склад органічних залишків залежить від багатьох факторів. Так, наприклад, склад рослинної біомаси може відрізнитись від сорту культури, якості ґрунтів та методу вирощування, рослин-попередників тощо. Для біозалишків тваринництва та птахівництва значення мають вид тварин чи птахів, порода, спосіб утримання, склад харчування і багато інших факторів. Тому результати, представлені в додатках даної роботи можна використати для оцінки потенціалу, але не для пошуку оптимальних режимів. Точність та відтворюваність експерименту буде залежати від однорідності і визначеності складу сировини.

Сучасні наукові дослідження переважно стосуються хіміко-біологічних процесів, видів бактерій та температурних режимів. Тому дослідження інших факторів впливу, таких, як параметри перемішування біосировини, є актуальними та дадуть додаткову інформацію для підвищення ефективності виробництва біогазу.

РОЗДІЛ 2.

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ БІОСИРОВИНИ

2.1. Порівняння та систематизація існуючих конструкцій обладнання для анаеробного збродження органічних залишків

Реактор це основний вузол біоенергетичної установки. Він здійснює анаеробне збродження сировини [10]. Класифікація обладнання для виробництва біогазу представлена в додатку Е. Відповідно до режиму завантаження біосировини та методів її завантаження реактори мають різну конструкцію. Конструкція реактора за режимом завантаження може бути накопичувального типу або потокового типу. За методами завантаження конструкція реактора може бути періодичної дії або безперервної дії [10–12] (додаток В).

У потокових конструкціях біосировина завантажується через однакові проміжки часу від 8 до 10 разів на добу і одночасно видаляється з реактора така ж кількість забродженої маси. Така конструкція дає можливість отримати максимальну кількість виробленого біогазу при умові дотримання усіх умов збродження біосировини.[8, 10].

У накопичувальні конструкції мають не менше двох реакторів, які завантажуються по черзі. Одна з умов це змішування свіжих субстратів із залишками забродженого шламу. На 5...7 день починається виділення біогазу і коли досягається максимальна кількість він поступово зменшується до мінімального значення. Після вивантаження відпрацьованого субстрату реактор черговий раз завантажується свіжою сировиною [7, 8, 10].

При порушенні температурних режимів відбувається в реакторах повна зупинка біотехнологічного процесу [7, 9]. Тому реактори повинні бути теплоізовані і має бути передбачена система завантаження біосировини, а також передбачена система з вивантаженням шламу і змішування [10]. Реактори можуть бути виготовлені з металу, пластику або залізобетону [13].

Щоб забезпечити тепловий режим, відповідно до біоенергетичного процесу життєдіяльності мікроорганізмів, утеплення системи реакторів може бути внутрішнім (вмонтованим всередині реактора) і зовнішнім (теплоізоляція, теплообмінники тощо). Перехід від однієї температурної зони до іншої повинен бути плавними і не мати різкої температурної зміни, яка дає можливість метаногенним мікроорганізмам пристосовуватись до мікрокліматичних умов в реакторі [13–15]. Отож, щоб було забезпечення стабільності проходження технологічного процесу, потрібно звертати увагу на сталість температурного рівня протягом усього процесу [8, 9].

Відповідно до об'ємів реакторів біогазові установки можуть бути різної потужності [4, 10, 18]:

- 1) великої потужності (1...10 тис. м³, великий промисловий завод);
- 2) середньої потужності (0,2...1 тис. м³, тваринницький комплекс);
- 3) малої потужності (1...20 м³, фермерське господарство).

Біогазові установки, оснащені автоматичними системами управління процесами режиму температури і перемішування субстрату.

Біогазові установки, які є в нашій країні, мають мезофільний режим роботи теплообмінників і пристроїв перемішування, працюють автоматизовано, а також мають реактори циліндричної форми. Більшість реакторів є горизонтального розташування, тому установлені на відкритих ділянках поза тваринницькими фермами.

Вартість біогазової установки залежить від складності її конструкції та наявності в ній оригінальних деталей. Реактор це найбільша частина установки, проте витрати на нього менші 30% від вартості самої установки. Щоб підвищити ефективність переробки біосировини потрібно удосконалити технологічний процес, щоб одночасно отримувати і біогаз, і органічні добрива, при цьому зменшувати об'єм реактора.

2.2. Моделювання процесу анаеробного розкладання біосировини в реакторі з виробництва біогазу

Анаеробне зброджування в установках з виробництва біогазу є одним з методів раціонального використання органічних відходів галузі тваринництва. Також вказана технологія забезпечує одночасне знезараження рідкого гною та перетворення його горючий біогаз, як енергетичний ресурс, та отримання побічного продукту – високоякісних добрив.

Дослідженням процесу метанового зброджування та конструюванню установок для виробництва біогазу останнім часом присвячена значна кількість наукових праць вітчизняних та зарубіжних вчених [4, 10, 11, 13, 22–26].

Математична модель оцінки виробленого об'єму біогазу з рослинних відходів, різних за хімічним складом та фізичними параметрами, залежно від базових факторів процесу обов'язково містить три взаємопов'язані етапи: розробку математичного опису об'єкта дослідження; вибір методу розв'язку системи рівнянь та реалізацію його в формі програми результатів моделювання, а також перевірку адекватності розробленої моделі [25, 35].

Сьогодні існує ряд математичних рівнянь, які, в достатній ступені, описують кінетику процесу виробництва біогазу з біомаси (додаток Г). Однак повний процес виробництва біогазу досі не має точного математичного опису. Під час вивчення процесу виробництва біогазу з рослинної сировини та обґрунтування параметрів і елементів обладнання біогазових установок переважно користуються емпіричними моделями процесу, які ґрунтуються на рівняннях мікробної кінетики та теорії хемостата [35].

Більша частина наукових праць для опису процесу виробництва біогазу з різної рослинної сировини ґрунтується на положеннях моделі Моно. Особливістю даної моделі є те, що вона відображає залежність питомої швидкості росту мікроорганізмів від концентрації субстрату [24]:

$$v = v_{p.m.} \cdot \mu_{суб} / (k_{\mu} + \mu_{суб}) \quad (2.1)$$

де k_{μ} – константа Моно, за якої швидкість росту становить половину максимальної;

$V_{p.m.}$ – максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів, доба⁻¹;

$\mu_{суб}$ – концентрація субстрату, кг/м³.

Однак модель Моно містить суттєвий недолік. Вона не придатна до опису субстратів з різними фізико-хімічними параметрами, оскільки не описує процес в часі.

Функція інгібування субстратами високих концентрацій була вперше запропонована Ендрюсом [13]:

$$v = v_{p.m.} \cdot \mu_{суб} / (k_{\mu} + \mu_{суб} + \mu_{суб}^2 / k_i) \quad (2.2)$$

де k_i – константа Моно, за якої швидкість росту становить половину максимальної;

Базуючись на моделі Моно відомий вчений Мозера вивів власну модель процесу виробництва біогазу з біосировини. Він ввів в відому модель коефіцієнт, який враховує характер залежності швидкості росту від концентрації субстрату. Даний коефіцієнт носить сигмоїдальний характер [1]:

$$v = v_{p.m.} \cdot \mu_{суб}^m / (k_{\mu} + \mu_{суб}^m) \quad (2.3)$$

де m – параметр, введений до рівняння [4], $m > 1$.

В науковій праці [6] модель Моно також модифікували за допомогою емпіричного коефіцієнту, який враховує на поверхні анаеробного біофільтра іммобілізацію метаногенної мікрофлори:

$$v = v_{p.m.} \cdot \mu_{суб} \cdot \lambda / (k_{\mu} + \mu_{суб}) \quad (2.4)$$

де λ – коефіцієнт іммобілізації на біофільтрі анаеробному.

Нажаль, ні модель Моно, ні залежності, які ґрунтуються на зазначеній моделі, не передбачають опис стадій процесу ферментації рослинної сировини в біогаз та можуть бути віднесені до формально кінетичних, які відображають процес лише за субстратом та сировиною – без обліку кількості виробленого за одиницю часу біогазу.

Також, в роботах, які описують процес ферментації біомаси в біогаз, в більшості, математично відображаються елементи обладнання, відповідального

за інтенсифікацію процесу метанового бродіння, а не відповідний процес виробництва біогазу в процесі анаеробної переробки субстрату.

Таким чином, в науковій праці [11] висвітлено математичну модель активації теплообмінних процесів шляхом вібраційного змішування. Зазначена модель містить відомі залежності матеріальних та теплових балансів рівнянь гідродинаміки та теплової передачі:

$$n_x \frac{\partial T}{\partial x} + n_y \frac{\partial T}{\partial y} + n_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial \tau} = K_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2.5)$$

$$D\vec{n}/dT = \vec{n} \cdot \xi \cdot \Delta^2 + u \cdot \vec{g} \cdot \gamma - \nabla P / \rho$$

$$\alpha = -(\chi / u_c) (\partial u / \partial m)_{m=0}$$

$$\text{div} \vec{n} = 0$$

де m – номер гармоніки (резонансної); χ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С); α – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·°С); ξ – коефіцієнт кінетичної в'язкості, м²/с; P – тиск, Па; ∇ – складові пульсацій; ρ – густина, кг/м³; u – швидкість руху робочих механізмів реактора виробництва біогазу з активатором, м/с; γ – коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹; g – прискорення вільного падіння, м/с²; K_T – коефіцієнт температуропровідності, м/с²; n – частота обертання, рад/с; T – температура, °С.

Дослідження системи зовнішнього обігрівання реактора з виробництва біогазу з біосировини представлені в роботі [9]. В науковій праці використано теплообмінник з кріпленням труб по зовнішній поверхні реактора. Математичне моделювання зазначеної системи містить модифіковані рівняння теплопередачі. Запишемо залежність для визначення товщини стінки ізоляції біореактора та середнього значення коефіцієнта теплопередачі:

$$U_{\text{сер}} = \int_{-p/2}^{+p/2} U(D_{\text{тр.зов.}}, p) dp \quad (2.6)$$

$$h_{\text{ізол}} = \chi_{\text{ізол}} (1/0,1 \cdot D_{\text{реак}} - 0,12) \quad (2.7)$$

де $\chi_{изол}$ – коефіцієнт теплопровідності ізоляції, Вт/(м·°С); $D_{реак}$ – діаметр реактора, м; p – крок труб теплообмінника, м; $D_{тр.зов.}$ – зовнішній діаметр теплообмінника, м; U – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·°С).

Існує перелік наукових досліджень, які відображають фізичний процес спливання, через товщу маси субстрату біореактора, бульбашки біогазу.

Наукова праця [24] містить математичну модель процесу руху бульбашки біогазу, яка ґрунтується на рівняннях гідродинаміки Нав'є-Стокса в циліндричній системі координат. Отримано, з врахуванням прийнятих припущень, наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial R_{бул.газ}} = 0, \quad -\frac{1}{\partial R_{бул.газ}} \frac{\partial P}{\partial \phi} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial R_{бул.газ}^2} + \frac{\partial v_z}{\partial R_{бул.газ}} \cdot \frac{\mu}{\partial R_{бул.газ}} - g \cdot \rho = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²; ρ – густина субстрату, кг/м³; v – швидкість піднімання бульбашки, м/год; μ – динамічна в'язкість субстрату, сСт; $R_{бул.газ}$ – радіус бульбашки газу, мм; P – тиск в напрямку руху бульбашки біогазу, Па.

З представлених в літературі рівнянь найбільш значущою є кінетична модель Конто, яка відображає процес анаеробної ферментації органічних відходів тваринництва. Модель відображає об'ємну швидкість виробництва біогазу в реакторі:

$$v = \frac{V_0 \cdot \mu_{суб}}{t_{ферм}} \left(1 - \frac{K}{v_{р.м.} \cdot t_{ферм} - 1 + K} \right) \quad (2.9)$$

де $v_{р.м.}$ – питома максимальна швидкість розмноження мікробіоти, доба⁻¹; V_0 – гранична межа виробництва газу з 1 м³ субстрату з органічної сировини певного складу, за умови нескінченної експозиції зброджування, м³/кг; $t_{ферм}$ – тривалість процесу ферментації, діб; $\mu_{суб}$ – концентрація субстрату, кг/м³; K – параметр кінетичний.

Представлена залежність 2.9 має високу відповідність експериментальним даним. З деякими розбіжностями залежність (2.9) можна

застосовувати до субстратів з ширшим діапазоном фізико-хімічних властивостей. Проте, з метою підвищення достовірності моделей кінетичного опису процесів анаеробної ферментації слід уточнити, шляхом експериментальних досліджень, деякі змінні незалежні параметри, які містять дані залежності.

Отже, проаналізовані рівняння математичних залежностей та методи обґрунтування параметрів установок з виробництва біогазу, які ґрунтуються на цих рівняннях, не включають важливі характеристики процесу, а саме фізико-хімічні властивості вихідного субстрату та конструкційно-технологічних параметрів, які підвищують ефективність процесу метанового бродіння (тривалість циклу, параметри змішування та геометрію робочих органів).

Пропонується математична модель технологічного процесу виробництва біогазу, яка ґрунтується на моделі Конто та містить рівняння теплопередачі та гідродинаміки. Запропоновано ввести до залежностей моделі коефіцієнт ψ , який дозволяє врахувати вплив змішування на ефективність процесу виробництва біогазу з органічної сировини.

$$\begin{cases} \partial V_{\text{біогаз}} / \partial t = v \cdot V_{\text{реакт}}; \\ v = V_0 \cdot \mu_{\text{суб}} \cdot \psi / t_{\text{ферм}} \left(1 - K / [v_{\text{р.м.}} \cdot t_{\text{ферм}} - 1 + K] \right); \\ \partial Q / \partial t = -U \cdot \Delta S_{\text{зм}} (T_{\text{мен}} - T_{\text{с.б.}}) - u_{\text{менл}} (\partial Q / \partial t); \\ \partial Q / \partial t = U \cdot \Delta S_{\text{зм}} (T_{\text{мен}} - T_{\text{с.б.}}); \\ f(T_{\text{с.б.}}) = \left([\alpha_1 / (1 + \alpha_2 \cdot T_{\text{с.б.}})] e^{\frac{\alpha_3 \cdot T_{\text{с.б.}}}{l \cdot m}} \right) + \alpha_4; \\ P = \Delta P_{\text{мо}} + \Delta P_{\text{тер}} + \Delta P_{\text{с.р.}} + P_1 \end{cases} \quad (2.10)$$

де P_1 – тиск над рідким субстратом в реакторі виробництва біогазу, Па; $\Delta P_{\text{мо}}$ – втрати тиску на подолання місцевих опорів, Па; $\Delta P_{\text{тер}}$ – втрати тиску на подолання тертя, Па; $\Delta P_{\text{с.р.}}$ – втрати тиску на подолання стовпа рідини, Па; P – тиск, який подається в барботажну трубу, щоб змішувати субстрат, який ферментується, всередині реактора, Па; m – кількість витків змішувача; l – довжина теплообмінного змішувача; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – коефіцієнти підтримування температури; $T_{\text{с.б.}}$ – температура субстрату в реакторі біогазової установки, К; $T_{\text{мен}}$ – температура теплоносія, К; $\Delta S_{\text{зм}}$ – площа дотику поверхні, яка передає

тепло, поверхні біореактора, м^2 ; U – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $u_{\text{тепл}}$ – швидкість руху теплоносія по трубі, $\text{м}/\text{с}$; Q – кількість теплоти, необхідна для обігрівання біореактора, Дж ; $\nu_{r.m.}$ – максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів, доба^{-1} ; K – параметр кінетичний; $\mu_{\text{суб}}$ – концентрація субстрату, $\text{кг}/\text{м}^3$; $t_{\text{ферм}}$ – тривалість процесу ферментації, дб ; ψ – коефіцієнт, який враховує вплив барботажного змішування на ефективність процесу виробництва біогазу з органічної сировини; V_0 – гранична межа виробництва газу з 1 м^3 субстрату з органічної сировини певного складу, за умови нескінченної експозиції зброджування, $\text{м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{реак}}$ – робочий об'єм біореактора, м^3 ; ν – швидкість виробництва біогазу, $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{доба})$; $V_{\text{біогаз}}$ – об'єм виробленого біогазу, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Представлена удосконалена математична модель (2.10) є основою інженерної методики розрахунку базових параметрів установки з виробництва біогазу, а саме: технологічних (частоти обертання змішувальних пристроїв, об'єму виробленого біогазу, тривалості процесу, вологості, температури) та конструкційних (геометричних розмірів системи обігрівання реактора; змішувального пристрою; самого реактора з виробництва біогазу).

2.3. Моделювання потужності змішування компонентів субстрату в реакторі з виробництва біогазу

Інтенсивність змішування компонентів у субстраті, який зброджується з метою виробництва біогазу, залежить від:

- температури зброджування, однорідності субстрату, кількості твердих частинок субстрату, які спливають (осідають) під час зброджування; кількості утворених бульбашок;

- товщина шару субстрату, який зброджується в реакторі з виробництва біогазу, повинна бути якомога меншою, оскільки вірогідність використання максимальної швидкості спливання бульбашок тим вища, чим менший об'єм реактора. Запишемо залежність, яка відображає швидкість (інтенсивність) змішування компонентів у субстраті:

$$V_{зміш} = v_{бул} + v_{осад} \quad (2.11)$$

де $v_{зміш}$ – швидкість змішування компонентів у субстраті, м/ГОД; $v_{бул}$ – швидкість спливання бульбашок газу, м/ГОД; $v_{осад}$ – швидкість осідання твердих частинок, м/ГОД.

$$v_{зміш} = v_{бул} + \sqrt{\frac{4 \cdot (\rho_m - \rho_{рід}) \cdot d \cdot g}{\rho_{рід} \cdot \xi}} \quad (2.12)$$

де $\rho_{рід}$ та ρ_m – відповідно густина рідини та твердих частинок у субстраті з органічної сировини для виробництва біогазу.

Запишемо, що $v_{зміш} \cdot g \cdot m_{суб} = N_{зміш}$, де g – прискорення вільного падіння, м/с²; $m_{суб}$ – маса субстрату, кг; $N_{зміш}$ – потужність, необхідна для змішування компонентів у субстраті.

Визначивши потужність змішування компонентів у субстраті ($N_{зміш}$) розрахуємо значення роботи (A), яка виконується, та спрогнозуємо об'єм метану, який очікуємо отримати у виробленому біогазі (V_{CH_4}) та вміст баласту ($V_{бал}$). Знаючи значення останніх двох параметрів можна визначити потрібний об'єм реактора $V_{реакт}$, який оптимально працює на вказаному змішуванні:

$$A = f(V_{CH_4}; V_{бал}; V_{реакт}) \quad (2.13)$$

Потужність змішування $N_{зміш}$, а, отже і потужність двигуна $N_{дв}$, який приводить в рух змішувальне обладнання, визначимо за залежністю:

$$N_{дв} = N_{зміш} = g \cdot m_{суб} \left(v_{бул} + \sqrt{\frac{4 \cdot (\rho_m - \rho_{рід}) \cdot d \cdot g}{\rho_{рід} \cdot \xi}} \right) \quad (2.14)$$

Значення швидкостей спливання бульбашок біогазу $v_{бул}$ та їх діаметрів d є незначними величинами. Отже, потужності від їхнього руху недостатньо для забезпечення оптимального змішування субстрату, що ферментується. Обов'язково потрібно передбачити змішувальний засіб в реакторі з виробництва біогазу.

2.4. Висновки до розділу 2

Відповідно до режиму завантаження біосировини та методів її завантаження реактори мають різну конструкцію. Запропонована класифікація обладнання для виробництва біогазу.

Пропонується математична модель технологічного процесу виробництва біогазу, яка ґрунтується на моделі Конто та містить рівняння теплопередачі та гідродинаміки. Запропоновано ввести до залежностей моделі коефіцієнт ψ , який дозволяє врахувати вплив змішування на ефективність процесу виробництва біогазу з органічної сировини.

Представлена удосконалена математична модель є основою інженерної методики розрахунку базових параметрів установки з виробництва біогазу, а саме: технологічних (частоти обертання змішувальних пристроїв, об'єму виробленого біогазу, тривалості процесу, вологості, температури) та конструкційних (геометричних розмірів системи обігрівання реактора; змішувального пристрою; самого реактора з виробництва біогазу).

Для приведення математичної моделі до керованих (змінних) параметрів експерименту, вводимо потужність приводу системи перемішування, як фактор впливу на якість перемішування.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ БІОСИРОВИНИ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ПО БІОГАЗУ ТА БІОДОБРИВУ

3.1. Методика експериментального дослідження

При проведенні даного експерименту встановлювалися зв'язки між вмістом в субстраті сухої речовини, температурою субстрату та потужністю, що витрачається на перемішування. Основною метою було підтвердження гіпотези про тенденції зміни продуктивності установки по біогазу від змінних параметрів, а також пошуків оптимальних значень вказаних параметрів.

Для виконання досліджень було обрано установку і дообладнано її потрібним вимірювальним обладнанням. Принципову схему реактора для отримання біогазу представлено на рис. 3.1.

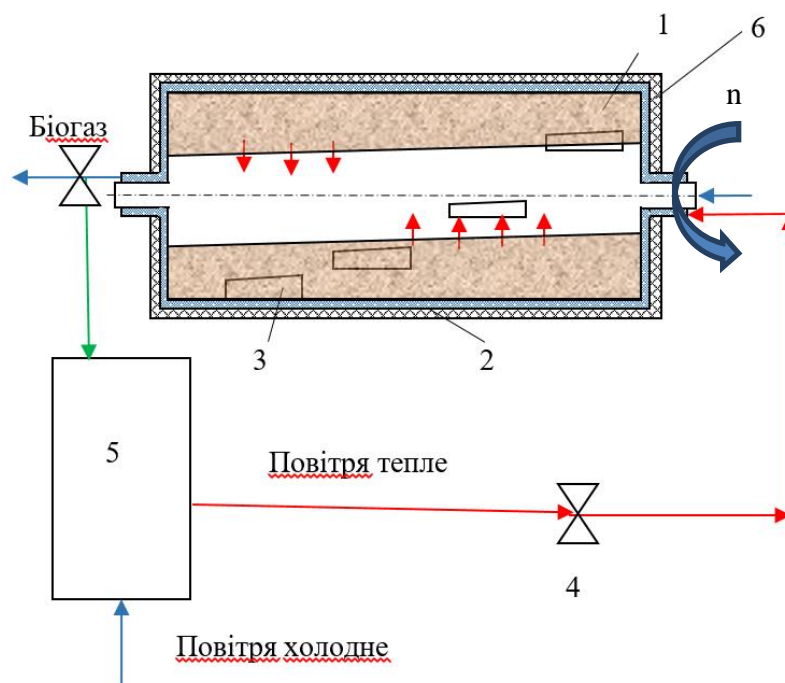


Рис. 3.1. Принципова схема установки для виробництва біогазу: 1 – субстрат; 2 – камера; 3 – лопатки для перемішування субстрату; 5 – теплогенератор газів; 4 – регулятор подачі теплоносія в реактор; 6 – шар утеплення.

Установка для проведення експерименту представляє собою реактор барабанного типу, який обертається навколо горизонтальної вісі за допомогою електроприводу з регульованою частотою. Субстрат 1 дозується та завантажується в камеру 2, до нього додається жива бактеріальна культура, попередньо активізована і змішана з невеликою кількістю такого ж субстрату. Після завантаження субстрат переміщується активно за допомогою приводу обертального руху та лопаток 3 для нормалізації його складу та рівномірного розподілу бактеріальної культури у всьому об'ємі завантаження.

Після вирівнювання складу суміші, камера 2 реактора герметизується і запускається цикл зброджування з виділенням біогазу. Під час циклу є необхідність підтримувати температуру сировини на заданому рівні, для чого в установці передбачений теплоізолюючий шар 6, який допомагає зберігати тепло, а також теплогенератор газовий 5 та регулятор подачі теплоносія в реактор 4. За допомогою теплогенератора підтримується задана температура, якщо тепловий баланс від'ємний. Якщо зовнішні температурні умови сприяють перегріванню матеріалу в камері 2, то за допомогою регулятора 4 в камеру можна подавати охолоджений агент для зниження температури до рівня, заданого дослідом.

Герметичність камери забезпечується ущільнюючими прокладками на завантажувальному люку та в місцях приєднання штуцерів для відбирання газу.

В якості вихідної сировини використовувався субстрат наступного складу: 60% вологого підстилкового гною, 18% деревної тирси, 22% соломи січки. Після попереднього перемішування регулювалася вологість сировини для доведення вмісту сухого компонента до встановлених планом дослідів величин.

Дослідна установка встановлена в критому ангарі, захищеному від впливу зовнішніх факторів. Камера реактора на 65% об'єму заповнювалася субстратом. Для точного дозування використовувались ваги лабораторні ТВ1-200-50-(400x550)-N.

Після герметизації камери за допомогою компресора КПП-230-24

низького тиску з неї видалялося повітря для створення умов анаеробної газифікації біомаси.

До штуцера відбору біогазу був прикріплений шланг, кінець якого опущений в ємність з водою для спостереження за виділенням газом. Після появи ознак виділення біогазу, шланг був підключений до лічильника ГСБ-400 через осушувач газу. Вміст метану в отриманому біогазі вимірювався за допомогою газоаналізатора АТМ-0,3.

Перемішування субстрату проводилось періодично, 2 рази на добу з рівними інтервалами. Перемішування сприяє вирівнюванню складу газу та виділенню газових бульбашок. Тривалість циклу перемішування 7 хв. Регулювання частоти обертання камери реактора здійснювалось частотним блоком керування та контролювалось тахометром.

Змінним параметром досліду також була температура субстрату, яка контролювалась датчиком ТСП -1-8, встановленим в камері. Контрольні виміри температури виконувались кожні 4 години.

3.2. Методика визначення сухої частки субстрату

Визначення вмісту сухої частки відбувається згідно методики, визначеної ДСТУ 8661:2016. При виконанні досліду використовувались сушильна шафа СШ-11-8.1, рефрактометр РПЛ-3, ваги лабораторні технічні, прилад Чижової, паперові пакети, фільтри, скляні бюкси, піпетки, щипці для відбирання навісок тощо.

Відбір проб відбувався з ретельно перемішаної навіски кожного виду сировини. З кожної навіски не менше 5 проб в скляні бюкси, які герметизувались, зважувались та маркувались. Вага відібраної проби в одній бюксі становила 500 г.

Масова частка вологи визначалась згідно ГОСТ 3626-73 шляхом висушування в шафі при температурі 130⁰С протягом 1 години. Після чого біксу охолоджують в ексикаторі протягом 40 хвилин та зважують. Після чого проводять послідовні цикли сушіння та охолодження поки різниця між

сусідніми зважуваннями не складе 0,001 г, що свідчить про закінчення висушування. Значення сухої частки розраховувалися за формулою:

$$C^p = 1 - \frac{g_1 - g_2}{g_1} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де C^p – вміст в досліджуваному матеріалі сухої частки, %;

g_1, g_2 – маса матеріалу до сушіння і після закінчення останнього циклу сушіння, г.

У відповідності до [37] було також визначено зольність суміші як важливий показник хімічного складу біомаси.

3.3. Методика проведення багатофакторного експерименту

З метою визначення впливу змінних параметрів процесу анаеробного зброджування на об'єм виробленого біогазу проведений багатофакторний експеримент за спрощеною схемою.

В процесі створення математичної моделі обрані параметри, що найбільше впливають на об'єм виробленого біогазу ($V_{\text{біогазу}}$), м³/т:

$$V_{\text{біогазу}} = f(M, T, N_{\text{дв.}}) \quad (3.2)$$

де M – частка сухої речовини в суміші, %; T – температура зброджування, °C; $N_{\text{дв.}}$ – потужність двигуна, який приводить в рух змішувальне обладнання, кВт.

Для визначення зв'язку між незалежними факторами ($M, T, N_{\text{дв.}}$) і залежним ($V_{\text{біогазу}}$) визначення характеру даного зв'язку і знаходження математичного рівняння для його опису проведені досліди та вимірювання згідно з запропонованим планом експерименту. Згідно спрощеного плану багатофакторного експерименту було проведено 14 дослідів з трикратним повторенням вимірювань.

Змінні фактори отримали наступні кодування, що зведені в таблицю 3.1: $X_1=M, X_2=T, X_3=N_{\text{дв.}}$. Найнижчі та найвищі рівні вищезазначених факторів також наведені в таблиці 3.1. Кількість паралельних дослідів, проведених за однакових умов, рівна $k=3$. Коефіцієнти полінома, що описує результати факторного експерименту, розраховані за методикою [36, 38].

Таблиця 3.1.

Змінні фактори та межі їх варіацій

Рівень варіації фактора	Суха речовина суміші M , %	Температура суміші T , °C	Потужність перемішування $N_{об}$, кВт
Верхній рівень (+)	35	60	3,0
Середній рівень (0)	30	50	2,25
Нижній рівень (-)	25	40	1,5

Після статистичної обробки результатів експерименту значення відносної похибки моделі має бути меншим за 1, 7% [36–38]. Значення розрахованої за зазначеною методикою відносної похибки є прийнятним при неперевищенні значення 8%. При перевищенні цього значення результати дослідів слід вважати некоректними і застосування їх для наукових висновків неможливе.

3.4. Експериментальні результати дослідження продуктивності установки по біогазу

Результати, отримані в ході експерименту, оброблено за допомогою пакету «Statistica». Після проведення вимірювань досліджуваних величин за методикою, описаною в п.3.2, п.3.3 в результаті їх статистичної обробки отримано дані, що зведені в таблицю 3.2. Отриманий масив даних значень об'єму виробленого біогазу, приведений до об'єму завантаженого субстрату та виміряний за добу активної фази циклу газоутворення $V_{біогаз}$ [$\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{доба})$] внесений до графі «результати експерименту» таблиці 3.2.

В результаті розрахунків визначені коефіцієнти регресії, що становлять:

$$b_0=1,203; b_1=0,027; b_2=0,041; b_3=0,006; b_{13}=0,004;$$

$$b_{23}=-0,001; b_{11}=0,001; b_{22}=-0,037; b_{33}=-0,024.$$

Критерій Кохрена було застосовано для здійснення перевірки однорідності дисперсій. Табличне значення критерію Кохрена становило $G^{табл}=0,4$ при 5 % рівні значущості для числа ступенів свободи рівному $f_2=2$ та

числі експериментів $f_1=15$. Отримано, що $G^{розр}=0,238 < G^{табл}(0,05; 15; 2)=0,4$ [36–38]. Отже, процес є відтворюваним.

Таблиця 3.2

Розрахункова матриця виробництва біогазу в реакторі

№ досл.	Змінні фактори				Результати експерименту, м ³ / м ³ · добу				Перевірка адекватності моделі		
	X_0	X_1	X_2	X_3	$V_{б1}$	$V_{б2}$	$V_{б3}$	$V_{б.ср}$	$V_{б.ср.кв}$	$(V_{б.ср} - V_{б.ср.кв})$	$(V_{б.ср} - V_{б.ср.кв})^2$
7	+	+	+	0	1,216	1,211	1,211	1,213	1,234	-0,022	0,000469
8	+	+	-	0	1,164	1,162	1,165	1,164	1,153	0,010	0,000107
12	+	-	+	0	1,166	1,172	1,175	1,171	1,181	-0,010	0,000107
10	+	-	-	0	1,120	1,122	1,124	1,122	1,100	0,022	0,000469
2	+	0	0	0	1,205	1,210	1,205	1,207	1,203	0,003	0,000011
11	+	+	0	+	1,223	1,215	1,219	1,219	1,217	0,002	0,000004
15	+	+	0	-	1,201	1,197	1,193	1,197	1,197	0,000	0,000000
6	+	-	0	+	1,158	1,160	1,151	1,156	1,157	0,000	0,000000
9	+	-	0	-	1,148	1,149	1,151	1,149	1,151	-0,002	0,000004
3	+	0	0	0	1,198	1,198	1,198	1,198	1,203	-0,005	0,000028
5	+	0	+	+	1,203	1,200	1,209	1,204	1,188	0,016	0,000248
4	+	0	+	-	1,197	1,194	1,192	1,194	1,177	0,017	0,000303
13	+	0	-	+	1,090	1,088	1,096	1,091	1,109	-0,017	0,000303
1	+	0	-	-	1,078	1,081	1,077	1,079	1,094	-0,016	0,000248
14	+	0	0	0	1,206	1,201	1,209	1,205	1,203	0,002	0,000004

Значимість коефіцієнтів рівняння регресії оцінено за критерієм Стьюдента. Табличне значення критерію Стьюдента при 5 % рівні значущості, $f_2=2$ та числі експериментів $f_1=15$ становило $t=4,3$ [36–38]. Коефіцієнти рівняння регресії оцінювали за їх значимістю і виключали малозначимі. Остаточо поліноміальне рівняння набуло вигляду:

$$V_{біогаз} = 1,203 + 0,027 \cdot X_1 + 0,041 \cdot X_2 + 0,006 \cdot X_3 + 0,004 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,001 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,001 \cdot X_1^2 - 0,037 \cdot X_2^2 - 0,024 \cdot X_3^2 \quad (3.3)$$

де:

$V_{біогаз}$ – кількість виробленого реактором біогазу, м³/[м³· доба];

X_1 (M) – вміст сухої речовини в субстраті, %;

$X_2 (T)$ – температура процесу виробництва біогазу, °C;

$X_3 (N_{\delta\delta})$ – потужність двигуна, який приводить в рух змішувальне обладнання, кВт.

Адекватність отриманого поліноміального рівняння даним експерименту виконували за критерієм Фішера, який застосований як до повного, так і спрощеного факторного експерименту. Дисперсію $S_y^2 \{Q_V\}$ вихідного параметру оптимізації визначали за результатами дослідів в графі «перевірка адекватності моделі» (табл. 3.2). Її розрахункове значення складає $S_y^2=0,09$. В результаті розрахунків отримано дисперсії адекватності $S^2_{середн}=0,162$. Розрахункове значення критерію Фішера при зазначених величинах дисперсій дорівнювало $F^{позп}=8,093$. Оскільки $F^{позп}=8,093 < F^{табл}(0,05; 15; 2)=19,38$.

Згідно отриманого критерію Фішера, адекватність рівняння регресії підтверджується [36–38]. Значення коефіцієнта детермінації склало $R^2=0,978$. Таким чином, отримана математична модель (3.3) залежності параметра $V_{\text{біогаз}}$ від змінних факторів є адекватною із 5 % ймовірністю помилковості.

Графічні зображення поверхонь згідно отриманого статистичною обробкою поліноміального рівняння (3.3) представлено на рис. 3.2-3.4.

Поверхні побудовані з почерговим виключенням одного зі змінних факторів, тобто у вигляді залежностей $V_{\text{біогаз}}=f(X1; X2)$; $V_{\text{біогаз}}=f(X3; X2)$; $V_{\text{біогаз}}=f(X1; X3)$. Таке представлення результатів експерименту є наочним і дозволяє візуалізувати тенденції зміни продуктивності установки по біогазу. Так, наприклад, з рис.3.2. видно, що об'єм виробленого біогазу $V_{\text{біогаз}}$ залежить від потужності змішування $N_{\delta\delta}$ та температури субстрату T , при чому має максимум при потужності $N_{\delta\delta}=2,7$ кВт і температурі $T=56,5^{\circ}\text{C}$. Отримані параметри є оптимальними режимами газифікації для максимізації продуктивності по газу.

При вивченні результатів, представлених на рис. 3.2. також можна зробити висновки про вплив на виробництво біогазу вмісту сухої речовини в субстраті: при збільшенні вмісту сухої частки M від 25 % до 35 %, об'єм утвореного біогазу зростає з 1,18 до 1,24 м³/м³·добу, тобто на 5,2%.

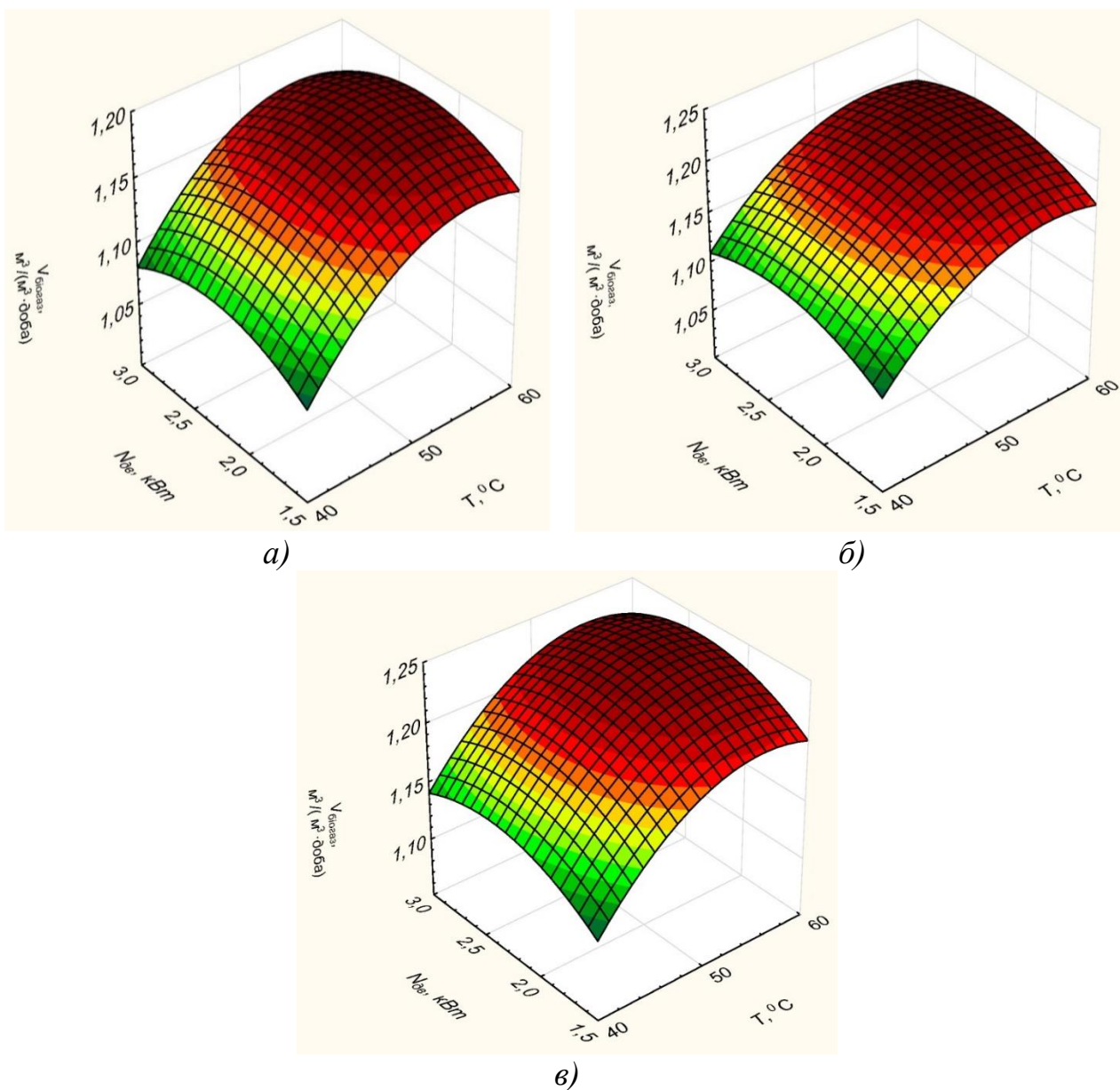


Рис. 3.2. Залежність кількості виробленого в реакторі біогазу $V_{\text{біогаз}}$ від потужності двигуна, який приводить в рух змішувальне обладнання, $N_{\text{дв}}$ та температура процесу виробництва біогазу T за умови, що вміст сухої речовини в субстраті становить: а) $M=25\%$; б) $M=30\%$; в) $M=35\%$.

Виходячи з рівняння регресії (1) найбільший вплив на кількості виробленого в реакторі біогазу $V_{\text{біогаз}}$ має температура субстрату T , дещо нижчий вплив здійснює вміст сухої речовини в субстраті. Найменше на кількості виробленого в реакторі біогазу $V_{\text{біогаз}}$ впливає потужність двигуна, який приводить в рух змішувальне обладнання.

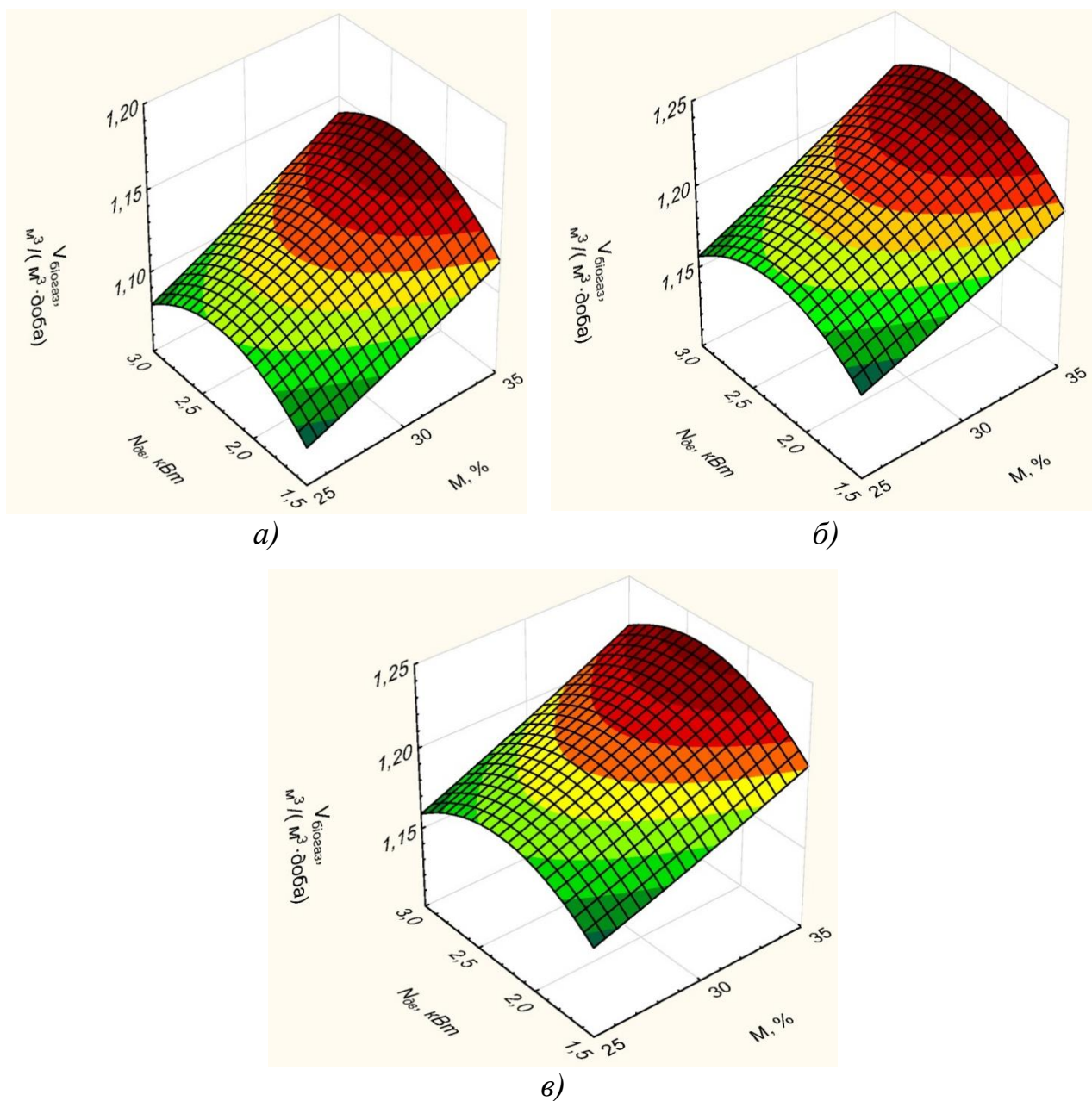


Рис. 3.3. Залежність кількості виробленого в реакторі біогазу $V_{\text{біогаз}}$ від потужності двигуна, який приводить в рух змішувальне обладнання, $N_{\text{дв}}$ та вмісту сухої речовини в субстраті M за умови, що температура процесу виробництва біогазу T становить: а) $T=40^{\circ}\text{C}$; б) $T=50^{\circ}\text{C}$; в) $T=60^{\circ}\text{C}$.

З іншого боку, дослідження встановили, що потужність перемішування має оптимальні значення $N_{\text{дв}}=2,6\dots 2,8$ кВт, при чому із збільшенням потужності перемішування продуктивність по газу спадає, що можна пояснити руйнуванням продуктивних зростаючих колоній мікроорганізмів. Після їх руйнування інтенсивним перемішуванням мікроорганізмам потрібно більше

часу на відновлення комфортних локальних умов життєдіяльності, що уповільнює процес газоутворення.

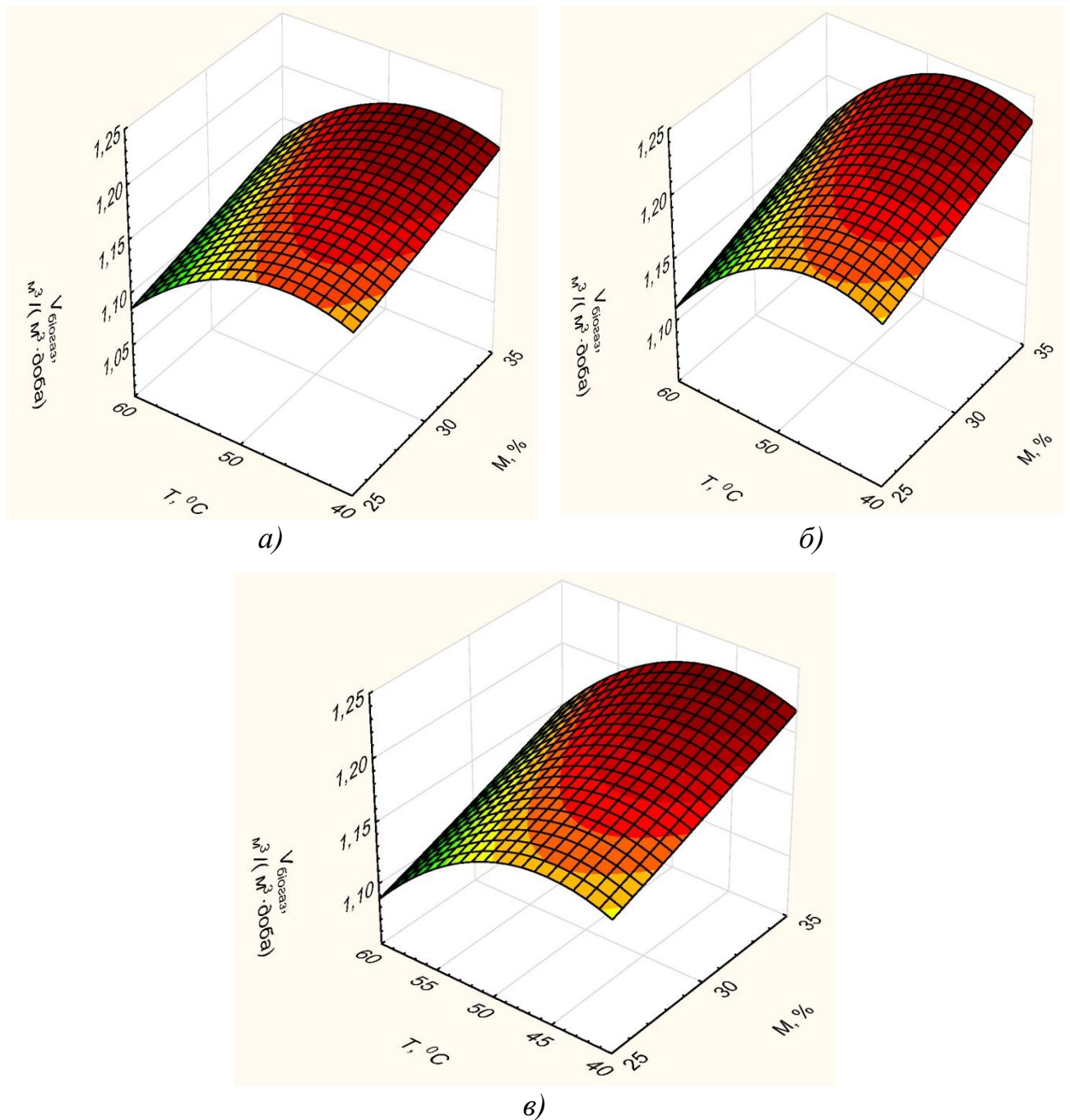


Рис. 3.4. Залежність кількості виробленого в реакторі біогазу $V_{\text{біогаз}}$ від вмісту сухої речовини в субстраті M та температури процесу виробництва біогазу T за умови, що потужності двигуна, який приводить в рух змішувальне обладнання, $N_{\text{дв}}$ становить: а) $N_{\text{дв}}=1,5$ кВт; б) $N_{\text{дв}}=2,25$ кВт; в) $N_{\text{дв}}=3,0$ кВт.

Встановлено, що найвища кількість виробленого біогазу $1,24 \text{ м}^3 / (\text{м}^3 \cdot \text{доба})$ досягається за умови, коли вмісту сухої речовини в субстраті M рівний $M=34\%$,

температури процесу виробництва біогазу T становить $T=57^{\circ}\text{C}$, а потужність двигуна, який здійснює перемішування, дорівнює $N_{\text{де}}=2,7$ кВт.

При цьому подальше збільшення сухої частки в суміші, що підлягає зброджуванню, буде впливати на зменшення вологості субстрату, що, за результатами досліджень [14, 26] негативно вплине на продуктивність по біогазу, оскільки оптимальні значення вологості субстрату становлять 65...70%.

Температура субстрату T , яка має найбільший вплив на продуктивність установки по газу, вимагає ускладненої системи регулювання, додаткових витрат на її підтримання. Саме тому ефективність утеплення біогазової установки дуже важлива для отримання високих показників продуктивності.

3.5. Висновки до розділу

В розділі представлені методика та результати експериментального дослідження згідно розробленого плану багатофакторного експерименту.

Згідно отриманого критерію Фішера, адекватність рівняння регресії підтверджується. Значення коефіцієнта детермінації склало $R^2=0,978$. Таким чином, отримана математична модель залежності параметра $V_{\text{біогаз}}$ від змінних факторів є адекватною із 5 % ймовірністю помилковості.

На основі результатів аналізу експериментальних досліджень визначені оптимальні параметри роботи досліджуваної установки. Найбільша кількість виробленого біогазу $1,24 \text{ м}^3/(\text{ м}^3 \cdot \text{добу})$ досягається за умови, коли вмісту сухої речовини в субстраті рівний $M=34\%$, температури процесу виробництва біогазу становить $T=57^{\circ}\text{C}$, а потужність двигуна, який здійснює перемішування, дорівнює $N_{\text{де}}=2,7$ кВт.

ВИСНОВКИ

1. Україна має потужний потенціал щодо розвитку біогазових технологій, а комплексне використання методів підвищення їх ефективності, поряд з організацією виробництва вітчизняного обладнання, зробить використання установок з виробництва біогазу більш економічним.

2. Проаналізовано відомі як в Україні, так і за кордоном, конструкції реакторів анаеробного зброджування біосировини, зазначено їх недоліки та переваги. Представлено удосконалену конструкцію реактора для виробництва біогазу з горизонтальною віссю обертання.

3. Запропонована математична модель технологічного процесу виробництва біогазу, яка ґрунтується на моделі Конто та містить рівняння теплопередачі та гідродинаміки. В рівняння моделі введено коефіцієнт ψ , який дозволяє врахувати вплив змішування на ефективність процесу виробництва біогазу з органічної сировини. Модель дозволяє встановити вплив фізико-хімічних властивостей біосировини, технологічних та енергетичних параметрів процесу на кількість виробленого в реакторі біогазу.

4. Методом реалізації багатофакторного експерименту встановлено вплив вмісту сухої речовини в субстраті, температури процесу зброджування та потужності двигуна, який приводить в рух змішувальне обладнання, на кількість виробленого в реакторі біогазу. Модель має високий ступінь відповідності експериментальним даним.

5. На основі результатів аналізу експериментальних досліджень визначені оптимальні параметри роботи досліджуваної установки. Найбільша кількість виробленого біогазу $1,24 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{доба})$ досягається за умови, коли вмісту сухої речовини в субстраті рівний 34%, температура процесу виробництва біогазу становить 57°C , а потужність двигуна, який приводить в рух обладнання для змішування компонентів у субстраті, дорівнює 2,7 кВт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Achfield G. The methane generation-Feedlot Monag. 1981, V.22, №4.
2. Alavi-Borazjani, S. A., Capela, I., & Tarelho, L. A. C. (2020). Over-acidification control strategies for enhanced biogas production from anaerobic digestion: A review. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105833. doi:10.1016/j.biombioe.2020.1
3. Bai, L., Deng, Y., Li, J., Ji, M., & Ruan, W. (2020). Role of the proportion of cattle manure and biogas residue on the degradation of lignocellulose and humification during composting. *Bioresource Technology*, 122941. doi:10.1016/j.biortech.2020.12
4. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: Теория и практика. (Пер. с нем.). М.: Колос, 1982. 148 с.
5. Browne JD, Murphy JD. Assessment of the resource associated with bio-methane from food waste. *Applied Energy* 2013; 104:170e7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.017>.
6. Cai, L., Cao, M.-K., Chen, T.-B., Guo, H.-T., & Zheng, G.-D. (2021). Microbial degradation in the co-composting of pig manure and biogas residue using a recyclable cement-based synthetic amendment. *Waste Management*, 126, 30–40. doi:10.1016/j.wasman.2021.02.0
7. Capa, A., García, R., Chen, D., Rubiera, F., Pevida, C., & Gil, M. V. (2020). On the effect of biogas composition on the H₂ production by sorption enhanced steam reforming (SESR). *Renewable Energy*. doi:10.1016/j.renene.2020.06.1
8. Chen, J., Risberg, M., Westerlund, L., Jansson, U., Lu, X., Wang, C., & Ji, X. (2020). A high efficient heat exchanger with twisted geometries for biogas process with manure slurry. *Applied Energy*, 279, 115871. doi:10.1016/j.apenergy.2020.1
9. Dozorets M.P. Fundamentals of heat engineering and heat supply of livestock farms. K.: Higher School, 1973. 256 p.

10. Конструктивні особливості метантенків. Поліщук В. та ін. MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Lublin, 2011. Т. 13В. С. 56-61.
11. Feiz, R., Johansson, M., Lindkvist, E., Moestedt, J., Påledal, S. N., & Svensson, N. (2020). Key performance indicators for biogas production—methodological insights on the life-cycle analysis of biogas production from source-separated food waste. *Energy*, 117462. doi:10.1016/j.energy.2020.117
12. Fuksa, P., Hakl, J., Míchal, P., Hrevušová, Z., Šantrůček, J., & Tlustoš, P. (2020). Effect of silage maize plant density and plant parts on biogas production and composition. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105770. doi:10.1016/j.biombioe.2020.10
13. Golub G.A., Kuharets S.M, Marus O.A. Bioenergy systems in agrarian production. Pos Ed. Ph.D., prof. Golub G.A. K. : NUBiP of Ukraine. 2017, 229 p.
14. Triolo Jin M. Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. *Bioresource technology*. 2012, V. 125. P. 226-32.
15. Herwintono, Winaya, A., Khotimah, K., & Hidayati, A. (2020). Improvement of biogas quality product from dairy cow manure using NaOH and Ca(OH)₂ absorbents on horizontal tube filtration system of mobile anaerobic digester. *Energy Reports*, 6, 319–324. doi:10.1016/j.egyr.2020.11.15
16. Jafar, R., & Awad, A. (2021). State and development of anaerobic technology for biogas production in Syria. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100253. doi:10.1016/j.clet.2021.100253
17. Jain, M. S., & Kalamdhad, A. S. (2018). A review on management of *Hydrilla verticillata* and its utilization as potential nitrogen-rich biomass for compost or biogas production. *Bioresource Technology Reports*, 1, 69–78. doi:10.1016/j.biteb.2018.03.00
18. Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V. K., Vijay, V., Thakur, I. S., Kumar, A. (2020). Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 123052. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123

19. Kuzmenko V.O., Golovchenko S.V., Yermolenko V.O. Pat. 47949 Ukraine, IPC C02F 101/30, C02F 11/04, C02F 3/00. Fermenter / owner Kuzmenko V.O. № u200910446; stated. October 15, 2009; Public. Feb 25, 2010, Bul. №4, 3 p.
20. Law of Ukraine "On secondary products of animal origin": as of April 7, 2015. Information from the Verkhovna Rada (VVR). 2015, No. 24, 171 p.
21. Liu, X., Dong, X., Chen, S., Yan, Y., He, J., Xu, J., & Xu, J. (2021). Enhancing erythritol production by wheat straw biochar-incorporated anaerobic fermentation of agricultural wastes using defatted *Schizochytrium* sp. biomass as supplementary feedstock. *Industrial Crops and Products*, 170, 113703. doi:10.1016/j.indcrop.2021.11
22. Luo, T., Khoshnevisan, B., Huang, R., Chen, Q., Mei, Z., Pan, J., & Liu, H. (2020). Analysis of revolution in decentralized biogas facilities caused by transition in Chinese rural areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110133. doi:10.1016/j.rser.2020.110133
23. Lynnyk M.K., Senchuk M.M. Technologies and technical means of production and use of organic fertilizers. *Glevakha*. 2012, 248 p.
24. Meng, X., Yan, J., Zuo, B., Wang, Y., Yuan, X., & Cui, Z. (2020). Full-scale of composting process of biogas residues from corn stover anaerobic digestion: Physical-chemical, biology parameters and maturity indexes during whole process. *Bioresource Technology*, 302, 122742. doi:10.1016/j.biortech.2020.12
25. Najafi, B., & Faizollahzadeh Ardabili, S. (2018). Application of ANFIS, ANN, and logistic methods in estimating biogas production from spent mushroom compost (SMC). *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 169–178. doi:10.1016/j.resconrec.2018.0
26. Pawelzik P, Carus M, Hotchkiss J, Narayan R, Selke S, Wellisch M, et al. (2013). Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials reviewing methodologies and deriving recommendations. *Resour Conserv Recycl*. 2013; 73:211e28. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.006>
27. Report and Recommendations on Organic Farming (Washington DC: USDA, 1980), p. xii. NAL Call# aS605.5 U52.

28. Голуб Г., Швец Р. Усовершенствование технологической схемы удаления и переработки навоза в органические удобрения и биогаз. MOTROL. Commission of Motorization and energetics in agriculture. 2014, Vol.16. No.4. P. 269-274.
29. Rudyk L.O., Zaichenko O.M., Yermolenko V.O. Pat. 48322 Ukraine, IPC C02F 11/04, C02F 3/00. Plant for feeding organic mass / owner Rudyk L.O. № u200910448; stated. October 15, 2009; Publications Mar 10, 2010, Bul. №5, 2 p.
30. Sweeten J. Metane production from Livestok Waste. Texas: Agrarian Progress. 1978, P. 24.
31. Targonia V.S, Klymenko V.P, Lutsenko M.M, Babinets T.L. Use of biomass for energy needs in agriculture. Biogas technologies; Research. 2009, 72 p.
32. Yali I.I., Drobot V.F. Mechanization of removal of manure on farms and complexes. K.: Harvest. 1981, P. 64-72.
33. Yang, H., & Deng, L. (2020). Using air instead of biogas for mixing and its effect on anaerobic digestion of animal wastewater with high suspended solids. Bioresource Technology, 318, 124047. doi:10.1016/j.biortech.2020.1
34. Yermolenko V.O., Rudyk L.O, Yermolenko O.V. Biologically active fertilizers. Production technology [monograph]. Cherkasy: ChTTU. 2013, 178 p.
35. Zolfaghari-Esmaeelabadi, M., & Hejazi, P. (2018). A new kinetic model for growth based on simultaneous substrate and biomass limitation in anaerobic fermentation using agar spheres as the model substrate. Biochemical Engineering Journal, 136, 88–101. doi:10.1016/j.bej.2018.04.013
36. Васильковський О., Лещенко С., Васильковська К., Петренко Д. Підручник дослідника: навч. посіб. Кіровоград, 2016. 204 с.
37. Грищук, Ю. С. (2008). Основи наукових досліджень : навч. посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2008. 232.
38. Мельников, С. В., Ацелкин, В. Р., Роцин, П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л. : Колос, 1980. 168 с.