

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

Кучерук Петро Петрович



УДК 662.767.2:628.336.5:602.3:579.85

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ШЛЯХОМ
СУМІСНОГО МЕТАНОВОГО БРОДІННЯ ГНОЙОВИХ ВІДХОДІВ ТА СИЛОСУ
КУКУРУДЗИ

05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики
Національної академії наук України, м. Київ.

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
Гелету́ха Гео́ргій Гео́ргійович,
Інститут технічної теплофізики Національної академії
наук України,
завідувач відділу теплофізичних проблем
біоенергетики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Голуб Геннадій Анатолійович,
завідувач кафедри механізації тваринництва
Національного університету біоресурсів та
природокористування України Міністерства освіти і
науки України;

кандидат технічних наук,
Сміхула Анатолій Володимирович,
Інститут газу Національної академії наук України,
старший науковий співробітник відділу захисту
атмосферного повітря від забруднення.

Захист відбудеться “17” “травня” 2016 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.224.02 в Інституті технічної теплофізики за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2-а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2-а.

Автореферат розіслано “14” “квітня” 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.224.02,
кандидат технічних наук



Г.Г. Гелету́ха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Диверсифікація джерел енергії на основі принципів сталого розвитку є загальносвітовим трендом та актуальною потребою в Україні. Одним з важливих секторів відновлюваних джерел енергії є виробництво та енергетичне використання біогазу. В Україні у 2014 р. Кабінетом Міністрів затверджено «Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2020 р.», яким зокрема передбачено збільшення встановленої потужності енергетичних установок на біогазі з 10 МВт_{ел} в 2014 р. до 290 МВт_{ел} в 2020 р. Виконання плану в частині біогазу потребуватиме використання, окрім відходів та побічної продукції агропромислового комплексу, спеціально вирощеної рослинної сировини. Силос кукурудзи є одним з найбільш поширених в країнах ЄС та енергетично привабливих видів рослинної сировини для виробництва біогазу. Передумовами для вирощування кукурудзи на біогаз в Україні є сприятливі природно-кліматичні умови та багаторічний досвід вирощування традиційних сортів кукурудзи.

У вітчизняній науці дослідження біогазових технологій фокусувались переважно на моно-зброджуванні субстратів з порівняно низькою концентрацією органічної речовини (рідкого гною, промислових стічних вод та їх осадів), що з енергетичної точки зору є малоефективним через низьку інтенсивність виходу біогазу з одиниці об'єму біореактора. Загальноприйнятою практикою інтенсифікації та збільшення валового виробництва біогазу є застосування сумісного метанового бродіння різних видів сировини, в тому числі спеціально вирощеної для виробництва біогазу. В Україні використання силосу кукурудзи для підвищення ефективності виробництва біогазу на діючих біогазових станціях досі не використовувалось. Обмеженими є також наукові та практичні дані, на основі яких можливо обґрунтовано вибирати технологічні режими роботи біогазової установки в залежності від частки силосу кукурудзи в суміші з гнойовими відходами.

Ефективна реалізація технології сумісного метанового бродіння гнойових відходів з силосом кукурудзи передбачає необхідність вибору раціональних технологічних режимів в залежності від частки силосу кукурудзи в суміші. Це обумовлює актуальність науково-технічного та економічного обґрунтування вибору технологічних параметрів роботи біореакторів проточного типу для виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи одержано при виконанні науково-дослідних робіт №31 «Дослідження та оптимізація технології сумісного зброджування гнойових відходів тварин з рослинними ко-субстратами» (№ ДР 0110U005384) та №36 «Розробка та дослідження технологій сумісного анаеробного зброджування відходів тваринництва і рослинництва України» (№ ДР 0107U008132), виконаних в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Біомаса як паливна сировина» («Біопалива»). У зазначених роботах автор приймав участь як виконавець.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є підвищення ефективності виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та

силосу кукурудзи та обґрунтування вибору оптимальних технологічних режимів роботи біогазових установок.

Для реалізації поставленої мети поставлено наступні задачі:

- виконати аналіз наукових положень, методів та результатів досліджень процесу метанового бродіння, а також сучасних тенденцій розвитку технологій виробництва біогазу;
- обґрунтувати вибір методів дослідження, адаптувати кінетичну модель біохімічного процесу для визначення кінетичних параметрів на основі експериментальних даних про об'єм та склад біогазу, отриманих в процесі періодичного метанового бродіння;
- експериментально дослідити: вплив співвідношення органічної речовини силосу кукурудзи та гнойових відходів на показники виходу біогазу; вплив концентрації органічної речовини в реакторі на показники виходу біогазу; питомий вихід біогазу з вітчизняних гібридів кукурудзи;
- визначити кінетичні параметри процесу та на їх основі виконати числове дослідження впливу технологічних режимів (органічне навантаження, гідравлічне навантаження) роботи біореактора проточного типу на показники виходу біогазу при сумісному метановому бродінні гнойових відходів та силосу кукурудзи;
- виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи в умовах України.

Об'єктом дослідження є процес сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи.

Предметом дослідження є вплив співвідношення органічної речовини інокуляту, силосу кукурудзи та гнойових відходів на показники виходу біогазу в періодичному та проточному режимах сумісного метанового бродіння, а також потенціал виробництва біогазу з кукурудзи в залежності від виду гібриду та умов вирощування.

Методи досліджень. В роботі використовувались експериментальні та теоретичні методи досліджень. Для дослідження закономірностей утворення біогазу організовано процес сумісного метанового бродіння в періодичному режимі. При обробці експериментальних даних використовувались методи математичної статистики та регресійного аналізу. Для аналізу кінетичних параметрів реакції ацетокластичного метаногенезу використано кінетичну модель розпаду органічної речовини першого порядку. Для чисельного дослідження впливу величин органічного та гідравлічного навантаження на показники виходу CH_4 використано математичну модель споживання субстрату та росту популяції бактерій в біореакторі повного змішування проточного типу, з використанням визначених кінетичних параметрів реакції ацетокластичного метаногенезу.

Наукова новизна одержаних результатів:

- математичну модель розпаду споживання субстрату та росту популяції бактерій в біореакторі повного змішування проточного типу адаптовано для визначення показників виходу метану, при цьому, на відміну від аналогів, в моделі розглядається одна лімітуюча реакція ацетокластичного метаногенезу з

використанням кінетичних параметрів, визначених за результатами періодичного процесу метанового бродіння;

- вперше отримано залежність кінетичних параметрів реакції ацетокластичного метаногенезу від співвідношення органічної речовини гнойових відходів та силосу кукурудзи;
- вперше встановлено показник граничного співвідношення органічної речовини суміші гнойових відходів та силосу кукурудзи до бактеріальної маси в біореакторі, при якому припиняється виділення біогазу, і який складає $30 \text{ гСОР/г}_{\text{к.м.}}$;
- вперше досліджено потенціал виходу біогазу з вітчизняних гібридів кукурудзи на силос.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Запропоновано метод чисельного дослідження показників виходу CH_4 для біореактора повного змішування проточного типу, з використанням кінетичних параметрів реакції ацетокластичного метаногенезу, які визначаються за результатами дослідження показників виходу CH_4 в періодичному процесі метанового бродіння.
2. На основі результатів чисельного дослідження показників виходу CH_4 , визначено граничні та оптимальні технологічні режими роботи біореактора повного змішування проточного типу при сумісному метановому бродінні гнойових відходів та силосу кукурудзи.
3. Результати досліджень використано при відпрацюванні робочих режимів та демонстрації дієздатності дослідно-промислової біогазової установки ТОВ «Екотенк», розташованої на базі свиноферми ПП Батура В.Н. в м. Слов'янськ, Донецької обл. Зокрема, було запропоновано оптимальне органічне навантаження при використанні суміші гнойових відходів з силосом кукурудзи. Результат впровадження підтверджено актом.
4. Методику експериментальних досліджень показників виходу біогазу та визначення кінетичних параметрів використано при проведенні наукового дослідження для діючої біогазової станції ТОВ «Глобинський біоенергетичний комплекс». Результат впровадження підтверджено актом.
5. Визначено економічні умови, за яких проекти біогазових установок, в залежності від частки силосу кукурудзи в суміші з гнойовими відходами, можуть бути рентабельними в умовах України.

Особистий внесок здобувача. Автор, спільно з науковим керівником, приймав участь у постановці задач досліджень, розробці методики оцінки потенціалу виробництва біогазу з силосу кукурудзи та обґрунтуванні величини “зеленого” тарифу на електричну енергію з біогазу. За співучасті співробітників відділу теплофізичних проблем біоенергетики ІТТФ НАН України, автором проведено експериментальні дослідження. Автором самостійно розроблено принципову схему дослідної установки та методику досліджень, проведено аналіз та узагальнення даних експериментальних досліджень, адаптовано метод визначення кінетичних параметрів реакції ацетокластичного метаногенезу на основі даних про вихід CH_4 в періодичному процесі метанового бродіння, виконано числові дослідження показників виходу CH_4 при роботі біореактора повного змішування проточного

типу, визначено та проаналізовано техніко-економічні показники проектів виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи.

В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: [1,5,8,10] – розробка методики та програми досліджень, аналіз та узагальнення результатів експериментальних досліджень; [3,4,6,9,12,14-16] – аналіз сучасного стану розвитку біогазових технологій в Україні та світі та оцінка енергетичного потенціалу виробництва біогазу в Україні, в т.ч. з гнойових відходів та силосу кукурудзи; [7,11] – розрахунок техніко-економічних показників проектів виробництва біогазу з гнойових відходів та силосу кукурудзи в Україні та обґрунтування величини «зеленого» тарифу на електричну енергію з біогазу; [17] – розробка стандартизованих методів відбирання проб біогазу; [18] – розробка методики узагальненої оцінки техніко-досяжного енергетичного потенціалу біогазу з гною свійських тварин та зі стічних вод. Результати в роботі [2], присвячені дослідженню кінетичних параметрів при періодичному метановому бродінні суміші гнойових відходів та силосу кукурудзи, опубліковано автором одноосібно.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались: на XI, X, IX, VIII, VII, VI, V, IV, та III Міжнародній конференції “Енергія з біомаси” (м. Київ, вересень 2015, 2014, 2013, 2012, 2011, 2010, 2009, 2008, 2006 р.р.); Семінарі «Розвиток біоенергетичних і біогазових технологій в Україні» (Київ, жовтень 2015 р.); Семінарі «Практичні аспекти отримання енергії з біомаси» (Київ, жовтень 2014р.); Науковій конференції «Біологічні ресурси і новітні біотехнології виробництва біопалив» (Київ, вересень 2014 р.); Семінарі «Практичні аспекти отримання та використання біогазу в Україні. Німецько-український діалог з питань біогазу» (Київ, вересень 2013 р.); VIII Міжнародній конференції «GreenEnergy» (Київ, червень 2013 р.); IV та III Українському біопаливному форумі (Київ, квітень 2012, 2011 р.р.); VII Міжнародній конференції «Сотрудничество для решения проблем отходов» (Харків, квітень 2010 р.); Міжнародній конференції «Біомаса» (Київ, листопад 2009 р.); Міжнародному конгресі «Біогаз — 2008» (Москва, листопад 2008 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (Москва, травень 2008 р.); Міжнародній конференції “Progress in Biogas – Biogas production from agricultural biomass and organic residues” (Штутгарт, вересень 2007 р.); V Міжнародній конференції “Проблемы промышленной теплотехники” (Київ, травень 2007 р.);

Публікації. За матеріалами та тематикою дисертації опубліковано 18 друкованих праць, з них: 10 статей – у фахових виданнях, що входять до переліку ДАК України; 1 стаття – у зарубіжному виданні, що входить до наукометричної бази даних Web of Science (ISI Tompson Reuters); 5 публікацій у збірниках та матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій; 1 національний стандарт України; 1 методику.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 155 найменувань, додатків. Загальний обсяг дисертації складає 164 сторінки та містить 82 рисунки та 33 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Наукові засади та розвиток технологій виробництва біогазу» наведено огляд сучасних тенденцій розвитку виробництва біогазу в світі, огляд діючих біогазових установок, передумов та перспектив розвитку виробництва біогазу в Україні. Розглянуто сучасні наукові положення про механізми перетворення органічної речовини в процесі метанового бродіння, роль та основні закономірності росту популяцій метаногенних бактерій, фактори впливу на швидкість метаногенезу, відомі методи досліджень кінетичних параметрів та моделювання процесу метанового бродіння. Проаналізовано гнойові відходи та силос кукурудзи з точки зору ефективності їх використання як субстратів для виробництва біогазу, а також існуючі результати досліджень їх сумісного зброджування.

Виробництво біогазу в світі зростає значними темпами, а лідером за обсягом виробництва біогазу з агропромислових відходів та сировини є Німеччина, де питомий вклад силосу кукурудзи становить близько 50%. В Україні досвід використання силосу кукурудзи для виробництва біогазу практично відсутній, обмежені дані досліджень про ефективність та кінетичні параметри процесу та рекомендації щодо вибору раціональних технологічних режимів та показників виходу біогазу при сумісному метановому бродінні силосу кукурудзи з гнойовими відходами.

Вагомий вклад в дослідження закономірностей та методів підвищення ефективності процесу метанового бродіння зробили вітчизняні вчені Семененко І.В., Смірнов О.П., Мовсєсов Г.Е., Дубровін В.О., Голуб Г.А., Криворучко В.В., Ратушняк Г.С. та інші, а також закордонні вчені Amon T., Chen Y., Hashimoto A.G., Batstone D.J., Siegrist H., Angelidaki I., S.W. Sötemann, Калюжный С.В., Вавилин В.А., Панцхава Е.С. та інші.

Виявлено, що комплексний механізм перетворення органічної речовини в біогаз частіше всього лімітується ферментативною реакцією ацетокластичного метаногенезу, а швидкість росту популяції метаногенів, що обумовлюють дану реакцію є найнижчою. Відтак, ацетокластичний метаногенез рядом авторів розглядається як процес, що визначає загальну кінетику виходу біогазу та обумовлює близько 70% загального виходу CH_4 . Швидкість ацетокластичного метаногенезу залежить від видового складу метаногенів, співвідношення C:N, концентрації аміаку, жирних кислот та іонів важких металів.

Також виявлено, що рідкі гнойові відходи переважно характеризуються низькою концентрацією органічної речовини (3...10%), низьким співвідношенням C:N (2...15) та високою концентрацією амонійного азоту (1...7 г/л), що негативно позначається на ефективності виробництва біогазу при їх моно-зброджуванні. Натомість, силос кукурудзи характеризується високою концентрацією органічної речовини (25...40%), високим співвідношенням C:N (20...60) та низькою концентрацією амонійного азоту (0,2...1,5 г/л).

Сформульовано робочу гіпотезу дослідження, яка полягає в тому, що додавання силосу кукурудзи до гнойових відходів оптимізує фізико-хімічний склад суміші та збільшує таким чином ефективність виробництва біогазу, а відтак ефективність використання об'єму біореактора та загальну енергетичну ефективність біогазової

установки. Визначено, що в подальших дослідженнях буде аналізуватись реакція ацетокластичного метаногенезу та відповідні кінетичні параметри. Визначено задачі експериментальних та чисельних досліджень.

У другому розділі «Експериментальні дослідження показників виходу біогазу в періодичному процесі» обґрунтовується вибір методу експериментальних досліджень, методу аналізу кінетичних параметрів, наводиться опис експериментального стенду з дослідження періодичного метанового бродіння та принципу його дії, приладів та методів вимірювання досліджуваних величин, характеристик використаних субстратів та інокуляту, програма та результати досліджень.

Описано методику експериментальних досліджень процесу сумісного метанового бродіння в періодичному режимі, а також залежності для статистичного аналізу експериментальних даних, зокрема: для визначення накопиченого виходу біогазу та CH_4 на одиницю внесеної свіжої маси та органічної речовини субстратів, поточної та кумулятивної швидкості виходу біогазу та CH_4 з одиниці об'єму біореактора в часі, ступеня розпаду органічної речовини субстратів у часі, накопиченого розпаду ацетату (CH_3COOH) в часі.

Представлено опис методики визначення кінетичних параметрів реакції ацетокластичного метаногенезу на основі експериментальних даних про об'єм та склад біогазу, отриманих в процесі періодичного метанового бродіння.

В умовах періодичного процесу метанового бродіння приріст популяції ацетокластичних метаногенів буде залежати від концентрації лімітуючого субстрату – ацетату. В свою чергу, концентрація ацетату в реакторі буде залежати, з однієї сторони, від швидкості перетворення проміжних органічних сполук, а з іншої – від швидкості його споживання метаногенами.

Після змішування свіжої маси субстрату з інокулятом, концентрація ацетату, внаслідок поступового розпаду комплексної органічної речовини, змінюється від деякої початкової величини $S_{\text{HAc},0}$ до $S_{\text{HAc},\text{max}}$ і в подальшому знижується до $S_{\text{HAc},\text{lim}}$. При цьому, за рахунок споживання ацетату, відбувається ріст клітинної маси ацетотрофних метаногенів від $X_{\text{ac},0}$ до $X_{\text{ac},\text{lim}}$.

За умови, коли швидкість утворення ацетату перевищує швидкість його споживання, а концентрація ацетату набагато більша за концентрацію клітинної маси метаногенів, можна стверджувати, що ріст популяції відбувається в фазі експоненційного росту, а значення константи швидкості $k \rightarrow k_{\text{max}}$.

Експоненційний ріст бактерій відповідає експоненційному розпаду субстрату, а у випадку процесу ацетокластичного метаногенезу – розпаду ацетату. Для визначення кінетичного параметру швидкості реакції ацетокластичного метаногенезу k , 1/добу, в роботі використовується аналітично-графічний метод з заміною дійсної концентрації S_{HAc} на еквівалентну, з використанням залежності:

$$k = -\ln(\tilde{S}_i / \tilde{S}_0) / t, \quad (1)$$

де \tilde{S}_i – еквівалентна маса ацетату на момент часу t , $\Gamma_{\text{екв.НAc}}$; \tilde{S}_0 – накопичений розпад ацетату за увесь період, $\Gamma_{\text{екв.НAc}}$.

Еквівалентна маса ацетату є масою біодоступної органічної речовини субстрату, що перетворюється в біогаз в процесі метанового бродіння і визначається

пропорційно виходу CH_4 в процесі метанового бродіння. При цьому робиться припущення, що початкова еквівалентна маса ацетату відповідає 70% накопиченого виходу CH_4 . Коефіцієнт еквівалентності визначається за масовим співвідношенням у стехіометричному рівнянні реакції ацетокластичного метаногенезу і рівний $0,2538 \text{ гНАс/гCH}_4$.

Графічна залежність параметра k від еквівалентної маси ацетату ($k = f(S)$) в межах експериментальних точок, що відповідають фазі експоненційного росту, має вид прямої, що описується рівнянням виду $y = -ax + b$, де b відповідає значенню кінетичного параметру швидкості ацетокластичного метаногенезу k_{max} . З графічної залежності встановлюється значення константи напівнасичення K_S , що відповідає значенню еквівалентної маси ацетату, при якій $k = 0,5k_{\text{max}}$.

Дослідна установка виконана у вигляді ряду аналогічних, герметично виконаних систем, кожна з яких включає в себе такі основні елементи як біореактор об'ємом 2 дм^3 та евідіометр з можливістю накопичення до $1,7 \text{ дм}^3$ біогазу (рис. 1). На рисунку 2 показано загальний вид дослідної установки.

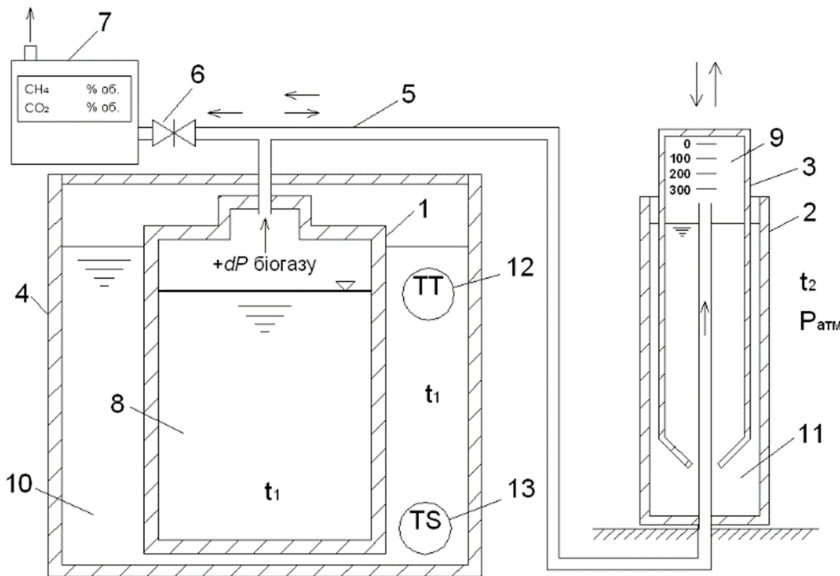


Рис. 1. Принципова схема одиної системи дослідної установки

- 1 - ємність біореактора;
- 2 - нерухома частина евідіометра;
- 3 - рухома частина евідіометра;
- 4 - ємність з теплоносієм;
- 5 - трубка з ПВХ;
- 6 - газовий запірний кран;
- 7 - газоаналізатор;
- 8 - робоче середовище біореактора;
- 9 - внутрішній простір евідіометра з біогазом;
- 10 - теплоносій (вода);
- 11 - 5% водний розчин NaCl ;
- 12 - ртутний термометр;
- 13 - терморегулятор

Ряд біореакторів поміщено в ємність з теплоносієм (водою), температура якого підтримується терморегулятором в заданому діапазоні ($36 \pm 1^\circ\text{C}$). При збільшенні парціального тиску біогазу в системі рухома частина евідіометра (3) піднімається відносно нерухомої (2) на деяку висоту h , що відповідає тарованому об'єму газу.

Вимірювання об'єму та складу біогазу виконувалось періодично, по мірі накопичення. Для вимірювання об'ємного вмісту в біогазі CH_4 та CO_2 використано портативний цифровий газоаналізатор Landtec GEM-500.

У роботі проведено три окремі серії експериментальних досліджень. У *першій серії* досліджувався вплив додавання різної частки сухої органічної речовини (СОР) силосу кукурудзи (СК) до гнойових відходів свиней (ГС) на показники виходу біогазу та CH_4 .



Рис. 2. Дослідна установка

Утворено 4 дослідних суміші інокуляту, ГС та СК з частками СОР СК до СОР ГС рівними 15%, 30%, 50% та 75%, та окремо ГС та СК. Початкова концентрація СОР суміші субстратів в реакторі склала 44,2-47,5 гСОР/л. Результати досліджень показали, що зі збільшенням частки СК збільшується питомий вихід біогазу та CH_4 на одиницю свіжої маси, разом з тим зменшується питомий вихід біогазу та CH_4 на одиницю маси СОР суміші ГС з СК (табл. 1).

Таблиця 1

Показники питомого виходу біогазу та CH_4

Показник	Одиниця виміру	Частка СОР СК в суміші з ГС, %					
		0	15	30	50	75	100
Накопичений вихід біогазу	$\text{л}_\text{н} \cdot \text{кг}^{-1}$	27,5	30,0	34,9	43,0	59,0	75,0
	$\text{л}_\text{н} \cdot \text{кг}^{-1} \text{СОР}$	577,8	536,7	515,5	496,7	489,1	371,9
Накопичений вихід CH_4	$\text{л}_\text{н} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{кг}^{-1}$	19,7	22,0	24,8	29,6	39,9	51,4
	$\text{л}_\text{н} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{кг}^{-1} \text{СОР}$	413,9	394,3	366,6	342,4	330,8	254,6

Виявлено, що зі збільшенням частки СОР СК суттєво зменшується час до досягнення найвищої кумулятивної швидкості виходу CH_4 – з 20,6 діб для ГС100% до 2,5 діб для СК100%, а саме значення такої швидкості збільшується з 0,41 до 0,94 $\text{л}_\text{н}/\text{кг}/\text{добу}$, відповідно (рис. 3а). Як наслідок це приводить до інтенсифікації виходу усього об'єму CH_4 у часі. При цьому, 95% виходу CH_4 з різних типів сумішей досягається за 40-45 діб, як видно з рисунку 3б.

За результатами даної серії експериментальних досліджень визначено кінетичні параметри реакції ацетокластичного метаногенезу k_{max} та K_S при зброджуванні сумішей з різною часткою СОР СК (табл. 2).

Таблиця 2

Кінетичні параметри ацетокластичного метаногенезу

Показник	Одиниця виміру	Частка СОР СК в суміші з ГС, %					
		0	15	30	50	75	100
K_S	$\text{г}_{\text{екв.}} \text{НАс} \cdot \text{л}^{-1}$	18,0	21,2	23,1	25,6	33,7	36,7
k_{max}	доба^{-1}	0,0623	0,0785	0,0862	0,0880	0,0820	0,0725

Виявлено, що зі збільшенням частки СОР СК майже пропорційно зростає значення константи напівнасичення K_S . При цьому, константа швидкості ацетокластичного метаногенезу збільшується до найвищого значення 0,088 доба^{-1}

для суміші з 50% СОР СК, подальше збільшення частки СОР СК призводить до зниження цього показника на 17,6%.

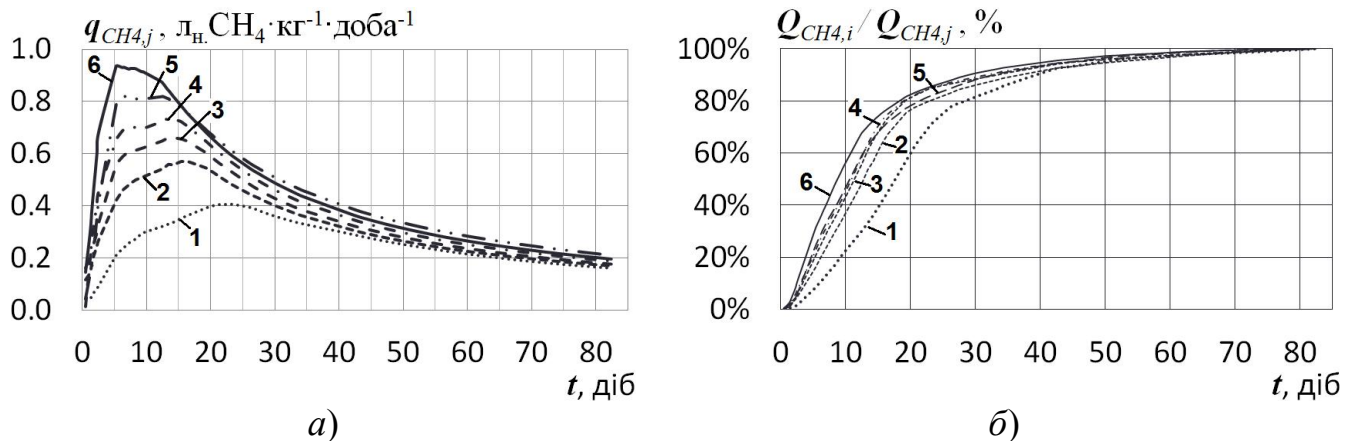


Рис. 3. Показники виходу CH_4 в залежності від частки СОР СК в суміші з ГС: а) кумулятивна швидкість виходу CH_4 в часі; б) частка виходу CH_4 в часі; 1 – ГС100%; 2 – ГС85%:СК15%; 3 – ГС70%:СК30%; 4 – ГС50%:СК50%; 5 – ГС25%:СК75%; 6 – СК100%.

За результатами даної серії експериментальних досліджень встановлено також величину співвідношення $\gamma_{\text{СКВ.НАС/гСОР}}$ в залежності від типу суміші ГС та СК.

У другій серії експериментальних досліджень було виявлено вплив початкової концентрації в біореакторі S_0 суміші ГС25% та СК75% в діапазоні 10,3-64,5 гСОР/л на швидкість метаногенезу. Дослідження показало, що збільшення початкової концентрації СОР істотним чином позначається на динаміці виходу біогазу та CH_4 у часі, зниженні питомого виходу біогазу та CH_4 за період спостережень, збільшенні періоду часу до досягнення найвищої швидкості виходу CH_4 і власне значеннях такої швидкості.

При збільшенні початкової концентрації СОР субстратів суттєво збільшується лаг-фаза процесу, що вказує на пригнічення метаболізму бактерій продуктами розпаду початкових стадій метанового бродіння (рис. 4а). При цьому, накопичений вихід CH_4 за період спостережень незначно знижується (рис. 4б), що ймовірно пояснюється більш тривалим періодом адаптації бактерій.

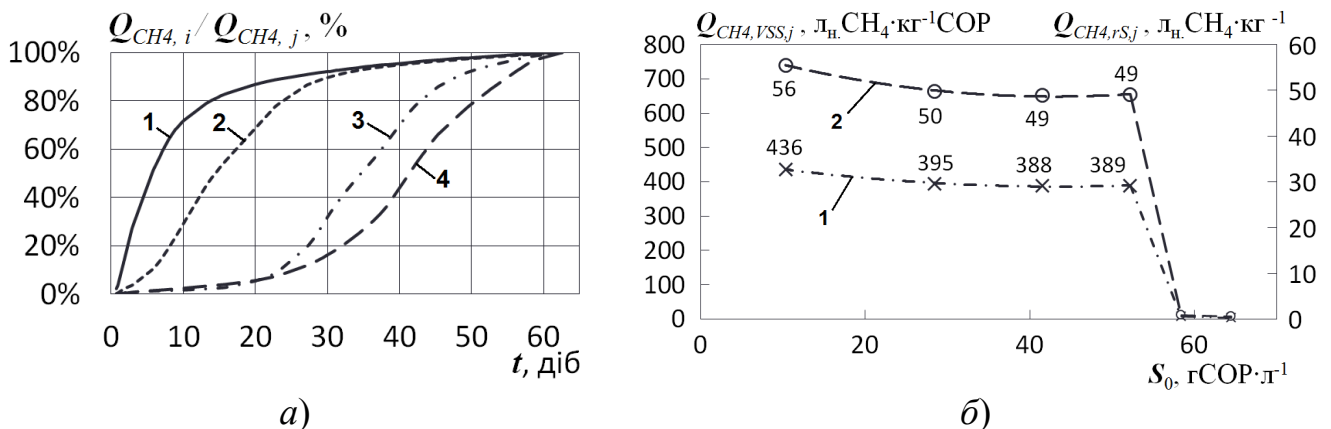


Рис. 4. Показники виходу CH_4 : а) частка виходу CH_4 в часі при S_0 : 1 – 10,3 гСОР/л; 2 – 28,4 гСОР/л; 3 – 41,6 гСОР/л; 4 – 52,2 гСОР/л; б) питомий вихід CH_4 : 1- на одиницю маси СОР; 2 – на одиницю сирової маси.

При частці СОР субстратів у суміші з інокулятом більшій, ніж 85% (58,4 гСОР/л), процес метанового бродіння практично не відбувається. Час до досягнення найвищої кумулятивної швидкості виходу CH_4 зростає від 1,9 діб для суміші з $S_0=10,3$ гСОР/л до 41,5 діб – для суміші з $S_0=52,2$ гСОР/л.

Водночас, збільшення початкової концентрації до 52,2 гСОР/л призводить до збільшення найвищої поточної швидкості виходу CH_4 на 73,4% (рис. 5а). Найвища кумулятивна швидкість виходу CH_4 при цьому знижується на 10-29%.

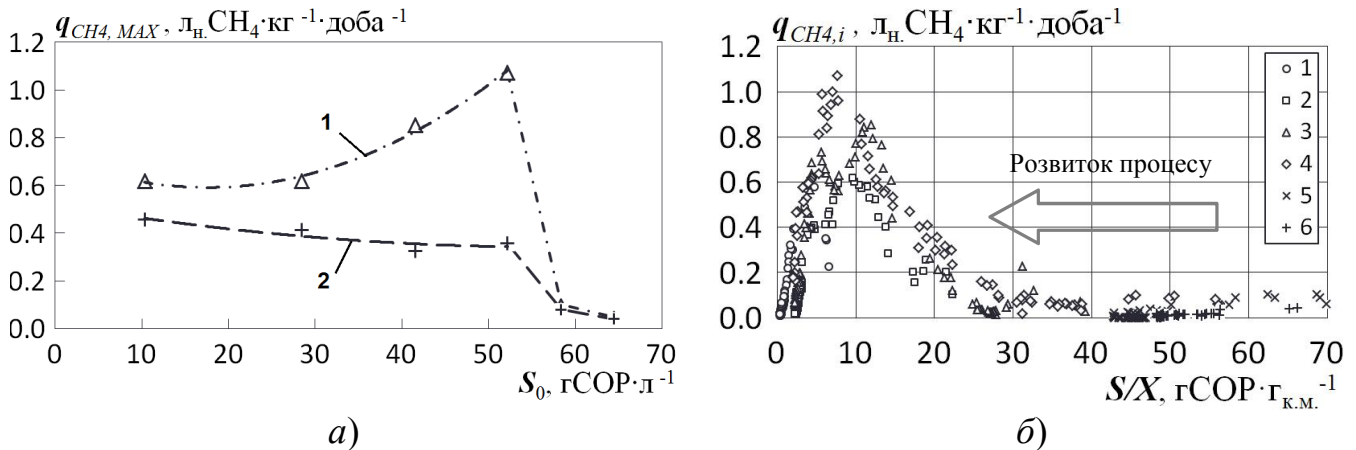


Рис. 5. Швидкість виходу CH_4 в залежності від:

а) початкової концентрації СОР суміші ГС та СК: 1 – найвища поточна швидкість; 2 – найвища кумулятивна швидкість; б) співвідношення органічної речовини субстратів та клітинної маси бактерій для сумішей з: 1 - $S_0=10,3$ гСОР/л; 2 - $S_0=28,4$ гСОР/л; 3 - $S_0=41,6$ гСОР/л; 4 - $S_0=52,2$ гСОР/л; 5 - $S_0=58,4$ гСОР/л; 6 - $S_0=64,5$ гСОР/л.

Аналіз залежності поточної швидкості виходу CH_4 від величини співвідношення органічної речовини субстратів та клітинної маси консорціуму бактерій в ході дослідження для сумішей з різними початковими концентраціями СОР (рис. 5б) показав, що при значеннях вищих за 25...30 гСОР/г_{к.м.} спостерігається критичне інгібування процесу метаногенезу, за якого швидкість виходу CH_4 не перевищує 10-15% від максимально можливої. При аналізі зроблено допущення, що початкова клітинна маса бактерій складає 7% від початкової маси СОР в інокуляті, а приріст клітинної маси – 7% від маси СОР субстратів, що розпалась.

У третій серії експериментальних досліджень виявлено вплив гібриду кукурудзи, внесення добрив при її вирощуванні та співвідношення С:N та С:P в органічній речовині СК на питомий вихід CH_4 та загальний потенціал виробництва CH_4 з кукурудзи, вирощеної на 1 га землі. Для досліджень використано стеблову масу вітчизняних гібридів кукурудзи Венілія (Е0, Е80-Ф) воскової фази стиглості (ФС), Бистриця 400 МВ (D50, D50-Ф) молочної ФС, Моніка 350 МВ (С50, С50-Ф) молочно-воскової ФС та Любава 270 МВ (В50, В50-Ф) воскової ФС, вирощені на дослідних полях Білоцерківського аграрного університету, з внесенням добрив (в позначенні гібриду використовується знак F) та без них. Вихід біогазу та CH_4 досліджено в процесі періодичного метанового бродіння зразків в суміші ГС25% та СК75% та при початковій концентрації СОР субстратів $S_0 = 38,5 \pm 3,5$ гСОР/л.

Дослідження показало, що від гібриду кукурудзи, стадія збору урожаю та внесення добрив можуть суттєво позначатись на виході CH_4 . Питомий вихід CH_4 на

одиницю внесеної маси кукурудзи для різних гібридів склав 70-98 л_н.СН₄·кг⁻¹ (рис. 6а), а на одиницю маси СОР – 233-312 л_н.СН₄·кг⁻¹СОР (рис. 6б).

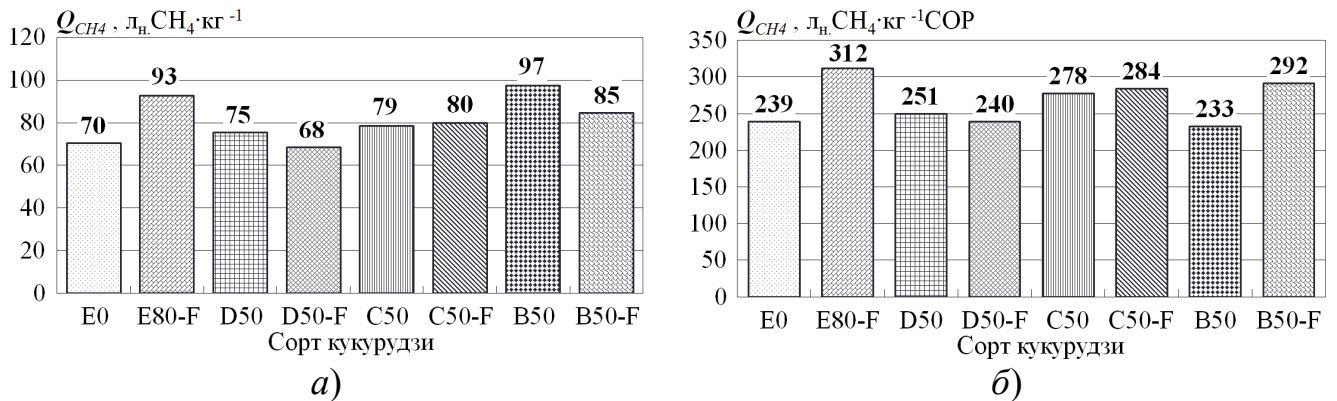


Рис. 6. Питомий вихід СН₄ з різних гібридів кукурудзи: а) на одиницю сирової маси кукурудзи; б) на одиницю маси СОР кукурудзи.

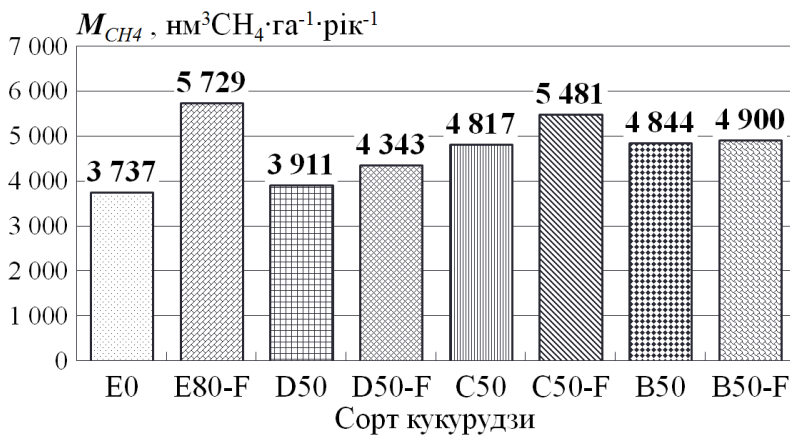


Рис. 7. Потенціал виробництва СН₄ з розрахунку на 1 га землі

З урахуванням урожайності досліджених гібридів кукурудзи оцінений потенціал виробництва СН₄ з розрахунку на 1 га землі складає 3,74-5,73 тис. нм³СН₄·га⁻¹·рік⁻¹ (рис. 7), що відповідає середньому рівню значень згідно літературних даних (2,9-9,0 тис. нм³СН₄·га⁻¹·рік⁻¹).

Як видно з рис. 8а, зі зменшенням величини співвідношення С:N у кукурудзі на 35% з 38 (в гібриді В50) до 25 (в гібриді Е80-Ф), на 34% збільшується питомий вихід СН₄ на одиницю маси СОР. Подібна тенденція помітна і для співвідношення С:Р (рис. 8б).

Як видно з рис. 8а, зі зменшенням величини

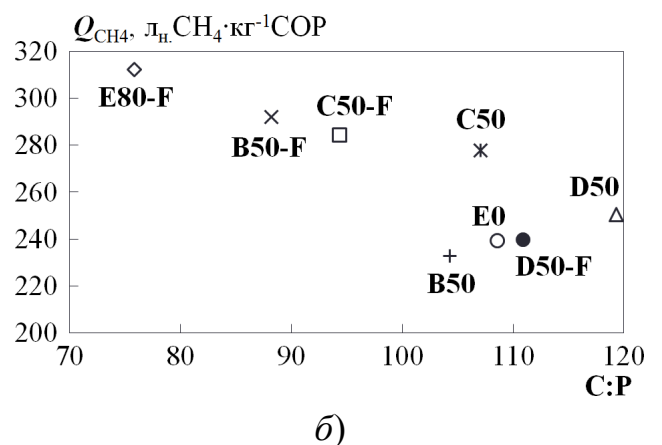
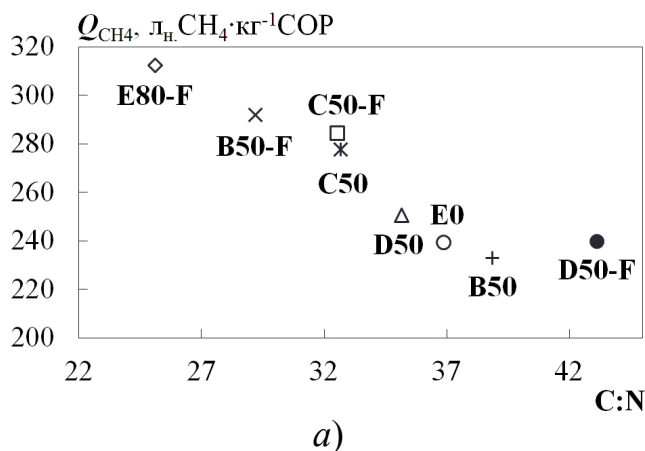


Рис. 8. Питомий вихід СН₄ на одиницю маси СОР в залежності від: а) співвідношення С:N в зразках кукурудзи; б) співвідношення С:Р в зразках кукурудзи.

У третьому розділі «Числові дослідження показників виходу метану при сумісному метановому бродінні гнойових відходів та силосу кукурудзи в біореакторі повного змішування проточного типу» наводяться опис числової моделі та результати чисельного дослідження показників роботи біореактора повного змішування проточного типу, а також рекомендації щодо оптимальних технологічних режимів.

Для числового дослідження впливу технологічних режимів роботи на показники виходу CH_4 вибрано математичну модель споживання субстрату та росту популяції бактерій в біореакторі повного змішування проточного типу (CSTR), який типово використовується при метановому бродінні агропромислових відходів та рослинної сировини. На відміну від відомої комплексної моделі процесу метанового бродіння (ADM1), що описує цілий ряд реакцій перетворення органічної речовини, пропонується розглядати одну лімітуючу реакцію ацетокластичного метаногенезу, що визначає загальну швидкість виходу CH_4 , з використанням відповідних кінетичних параметрів k_{\max} та K_S , визначених за результатами періодичного метанового бродіння відповідних сумішей субстратів.

Для оцінки питомої швидкості виходу CH_4 P_{CH_4} , $\text{лн. CH}_4/\text{м}^3/\text{добу}$, використано наступну залежність:

$$P_{\text{CH}_4} = \frac{DY_{P/S}}{0.7 \rho_{\text{CH}_4}} \cdot \left(S_0 - \frac{DK_S}{k_{\max} - D} \right), \quad (2)$$

де D – гідравлічне навантаження реактора, 1/добу; k_{\max} та K_S – відповідно константа швидкості реакції ацетокластичного метаногенезу, 1/добу, та константа напівнасичення, гекв. НАс/л ; ρ_{CH_4} – питома густина метану, $0,717 \text{ кг/м}^3$; $Y_{P/S}$ – вихід CH_4 при розпаді ацетату, $\text{гCH}_4/\text{гНАс}$; S_0 – початкова еквівалентна концентрація ацетату у вхідному субстраті, гекв. НАс/л , що визначається за співвідношенням гекв. НАс/гСОР субстрату, встановленому за результатами експериментальних досліджень.

Відповідно, питомий вихід CH_4 на одиницю маси органічної речовини субстрату, внесеної в реактор, Q_{CH_4} , $\text{лн. CH}_4/\text{гСОР}$, визначається як:

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{P_{\text{CH}_4}}{DS_0} \quad (3)$$

При чисельному дослідженні початкові еквівалентні концентрації ацетату в сумішах ГС та СК та кінетичні параметри k_{\max} та K_S прийнято на основі даних експериментальних досліджень для відповідних типів сумішей. Вихід клітинної маси ацетокластичних метаногенів прийнято $0,04 \text{ г}_{\text{к.м.}}/\text{гекв. НАс}$.

На рисунку 9 представлено результати оцінки показників виходу CH_4 при сумісному метановому бродінні сумішей ГС та СК в біореакторі типу CSTR в залежності від вибраних технологічних режимів.

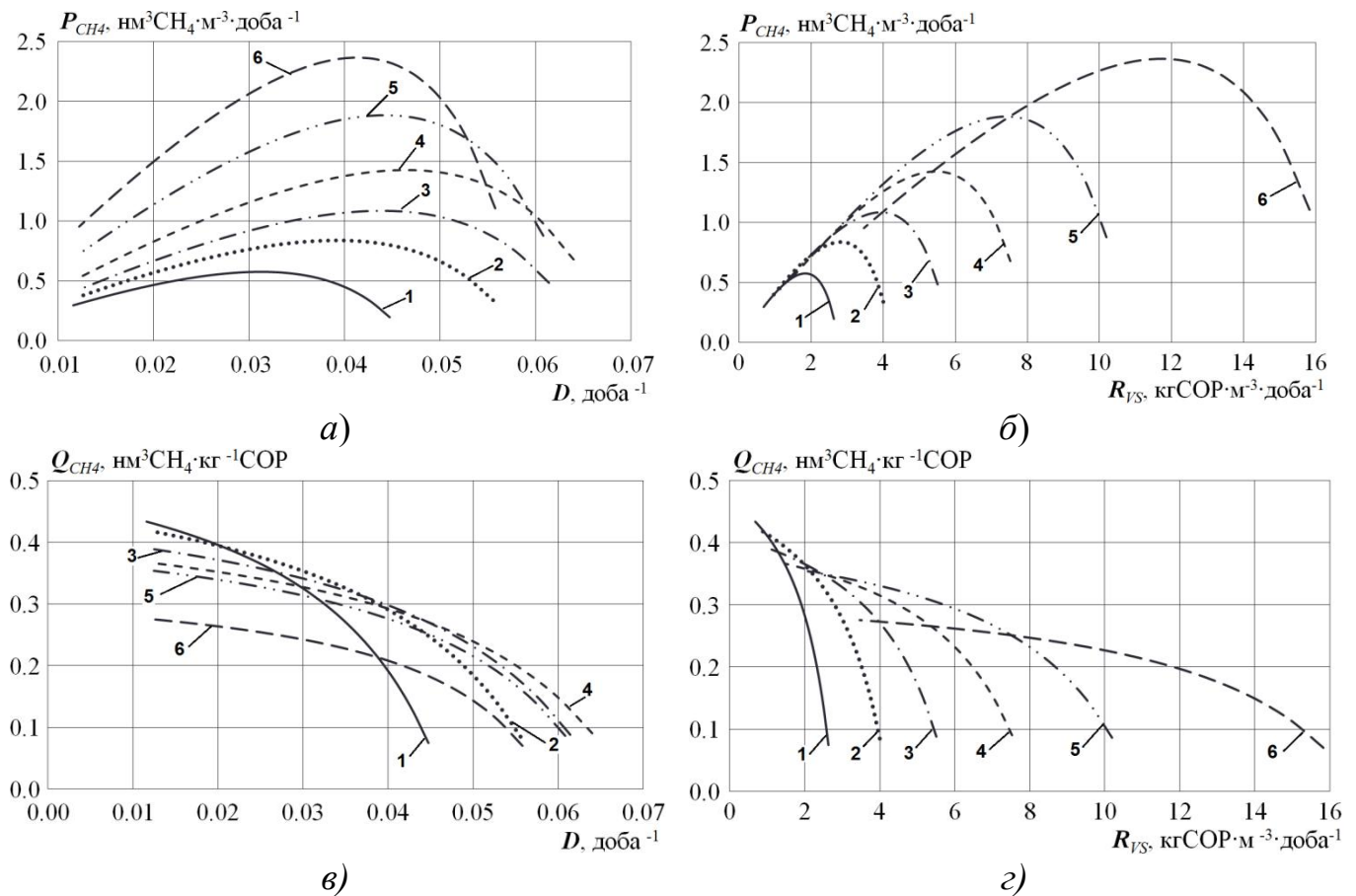


Рис. 9. Розрахункові показники виходу CH_4 при сумісному метановому бродінні сумішей ГС та СК в біореакторі типу CSTR:

а) питома швидкість виходу CH_4 в залежності від гідравлічного навантаження; б) питома швидкість виходу CH_4 в залежності від органічного навантаження; в) питомий вихід CH_4 на 1 кг СОР в залежності від гідравлічного навантаження; г) питомий вихід CH_4 на 1 кг СОР в залежності від органічного навантаження; 1 – ГС100%; 2 – ГС85%:СК15%; 3 – ГС70%:СК30%; 4 – ГС50%:СК50%; 5 – ГС25%:СК75%; 6 – СК100%.

За результатами числового розв'язання рівнянь 2 та 3, а також з урахуванням результатів другої серії експериментальних досліджень встановлено 5 характерних режимів роботи CSTR біореактора (рис. 10), що відповідають значенням гідравлічного навантаження D та органічного навантаження R_{VS} , за яких: 1 – швидкість виходу CH_4 падає до нуля внаслідок критичного вимивання популяції метаногенів; 2 – швидкість виходу CH_4 є найвищою і відповідає максимальному потоку метаногенів $D \cdot X$ (без урахування факторів інгібування процесу); 3 – значення критеріального комплексу $[P_{\text{CH}_4} \times Q_{\text{CH}_4}]$ є найвищим; 4 – співвідношення S/X є граничним (30 гСОР/г_{к.м.}), що може призвести до субстратного інгібування процесу; 5 – частка виходу CH_4 складає 95%, а подальше збільшення тривалості процесу є нераціональним.

Вибір раціонального режиму може виконуватись з урахуванням встановлених критеріїв ефективності роботи біореактора, зокрема терміну окупності проекту, дотримання екологічних та агротехнічних нормативів. З точки зору оптимальної комбінації ефективності використання потенціалу виходу CH_4 з сировини та

ефективності використання об'єму біореактора можна рекомендувати вибір технологічних параметрів в межах режимів 3 та 5.

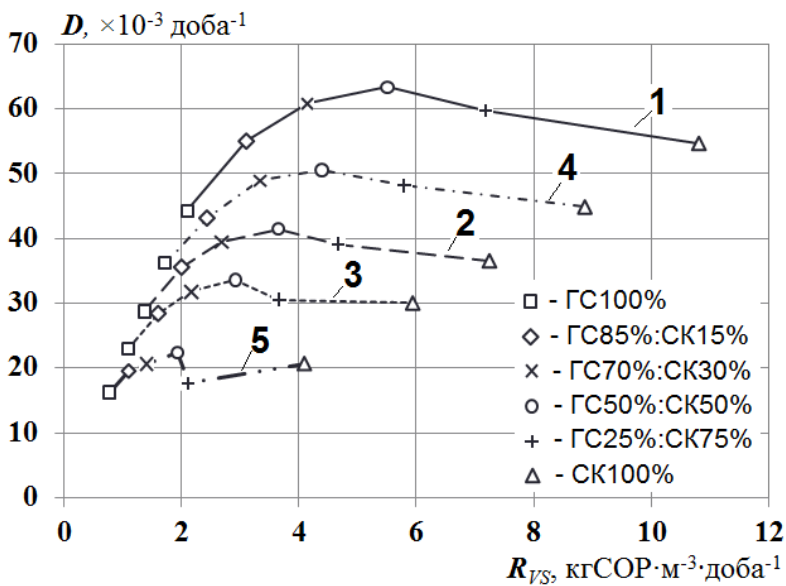


Рис. 10. Технологічні режими роботи CSTR біореактора при метановому бродінні ГС з СК

технологічного режиму, що відповідає величинам $R_{VS} = 3,15$ кгСОР/м³/добу та $D = 0,0219$ доба⁻¹, інтенсивність виходу СН₄ складає 1,126 м³СН₄/м³/добу, а при зброджуванні суміші ГС44%:СК56%, при $R_{VS} = 2,3$ кгСОР/м³/добу та $D = 0,0215$ доба⁻¹, інтенсивність виходу СН₄ складає 0,758 м³СН₄/м³/добу. Розбіжність цих показників з відповідними показниками, отриманими в результаті числового моделювання, складає: для суміші ГС25%:СК75% - (-3,9%) за показником $P_{СН4}$ та (-5,6%) за показником $Q_{СН4}$; для суміші ГС44%:СК56% - (+4,9%) за показником $P_{СН4}$ та (+4,9%) за показником $Q_{СН4}$, що підтверджує адекватність оцінених кінетичних параметрів та числової моделі.

За результатами проведених в роботі досліджень, для ТОВ «Екотенк» (м. Слов'янськ, Україна) було надано рекомендації для відпрацювання робочих режимів дослідно-промислової установки, де встановлено, що додавання силосу кукурудзи (50% за СОР) до гнойових відходів свиноферми підвищує інтенсивність виходу біогазу з одиниці об'єму біореактора в 1,9-2,0 рази до 1,9-2,1 м³/м³/добу при органічному навантаженні 3,8 кгСОР/м³/добу. Розбіжність отриманих даних з наданими розрахунковими значеннями складає 8,6-12,4%, що підтверджено відповідним актом впровадження.

У четвертому розділі «Техніко-економічне обґрунтування виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи» аналізуються економічні показники проектів біогазових станцій при сумісному зброджуванні СК та ГС у порівнянні з проектами моно-зброджування ГС. При аналізі використано показники виходу біогазу, отримані за результатами числових досліджень.

Розглядається проект будівництва біогазової станції в умовах України з основним біореактором робочим об'ємом 5120 м³ та енергетичним використанням біогазу з виробництвом електричної та теплової енергії в когенераційній установці

Адекватність отриманих результатів числового моделювання перевірено шляхом співставлення їх з проектними даними при зброджуванні аналогів сумішей з часткою СОР СК 75% та 56%, запропонованими однією з провідних німецьких компаній (*Envitec Biogas AG*), що спеціалізується на технології зброджування силосу кукурудзи. Так, згідно проектних даних, при зброджуванні суміші ГС25%:СК75%, за

(КГУ), потужність якої варіюється в залежності від розрахункових показників виходу CH_4 для різних типів сумішей СК та ГС.

При розрахунку інвестиційних затрат враховано вартість усіх необхідних споруд, обладнання та матеріалів, в т.ч. систем подачі силосу кукурудзи, силосних кагатів, лагун для зброженої маси, а також затрати на виконання проектних, будівельних, монтажних та пуско-налагоджувальних робіт. Величини затрат прийнято на основі комерційних пропозицій європейських компаній та власних оцінок автора.

На рис. 11 показано, що при збільшенні частки СОР СК суттєво знижується величина найменшої питомої вартості проекту біогазової станції за рахунок збільшення інтенсивності виходу CH_4 з 1 м^3 біореактора. З іншої сторони, істотно збільшуються затрати на сировину, зокрема СК.

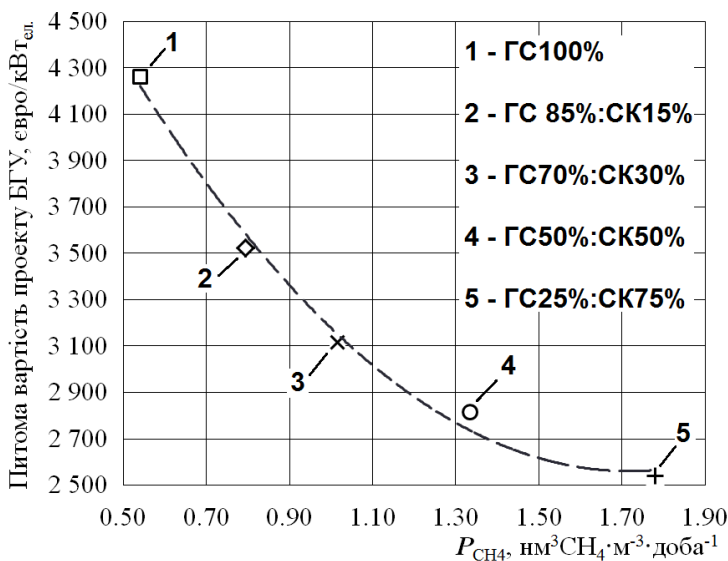


Рис. 11. Питома вартість проекту біогазової установки в залежності від частки СОР СК

Для аналізу простих термінів окупності (ПТО) моделюються вхідні параметри: коефіцієнт “зеленого” тарифу на електричну енергію (Кзт), частка корисної утилізації надлишку теплоти від КГУ (ВТ), ціна ГС та СК. В базовому економічному сценарії прийнято наступні вхідні параметри: Кзт – 2,3 (відповідає 0,1239 євро/кВт·год); ВТ – 0%; ціна ГС – 50 грн/т; ціна СК – 400 грн/т.

На рис. 12 представлено результати оцінки найменшого значення ПТО для 9 економічних сценаріїв.

Виявлено, що в базовому економічному сценарії збільшення частки СК до 50% та більше призводить до збільшення ПТО на 7,9-36,2%, натомість додавання 15% СОР СК дозволяє знизити ПТО на 6,8%, а додавання 30% СОР СК – на 4,9%, у порівнянні з моно-зброджуванням ГС. При цьому у всіх економічних сценаріях додавання до гнойових відходів до 30% СОР СК дозволяє знизити ПТО проектів на 0,4-16,0%.

Найбільш суттєво на терміні окупності позначається величина Кзт. При цьому, для усіх типів сумішей ГС та СК, для досягнення ПТО проектів на рівні 5,6-6,5 років величина Кзт повинна бути не меншою 3,0 або частка утилізації надлишку тепла повинна складати не менше 75%.

Зниження ціни сировини (СК до 300 грн/т, ГС до 37,5 грн/т) дозволяє знизити ПТО усіх типів проектів сумісного метанового бродиння СК та ГС, у порівнянні з моно-зброджуванням ГС, а оптимум виявлено для проекту з використанням 30% СОР СК. При збільшенні базової ціни сировини на 25% (СК до 500 грн/т, ГС до 62,5 грн/т) ПТО проекту з використанням 50% СОР СК збільшується на 19,1%, у

порівнянні з моно-зброджуванням ГС, а з використанням 75% СОР СК – ПТО проекту перевищує проектний термін роботи БГУ 20 років.

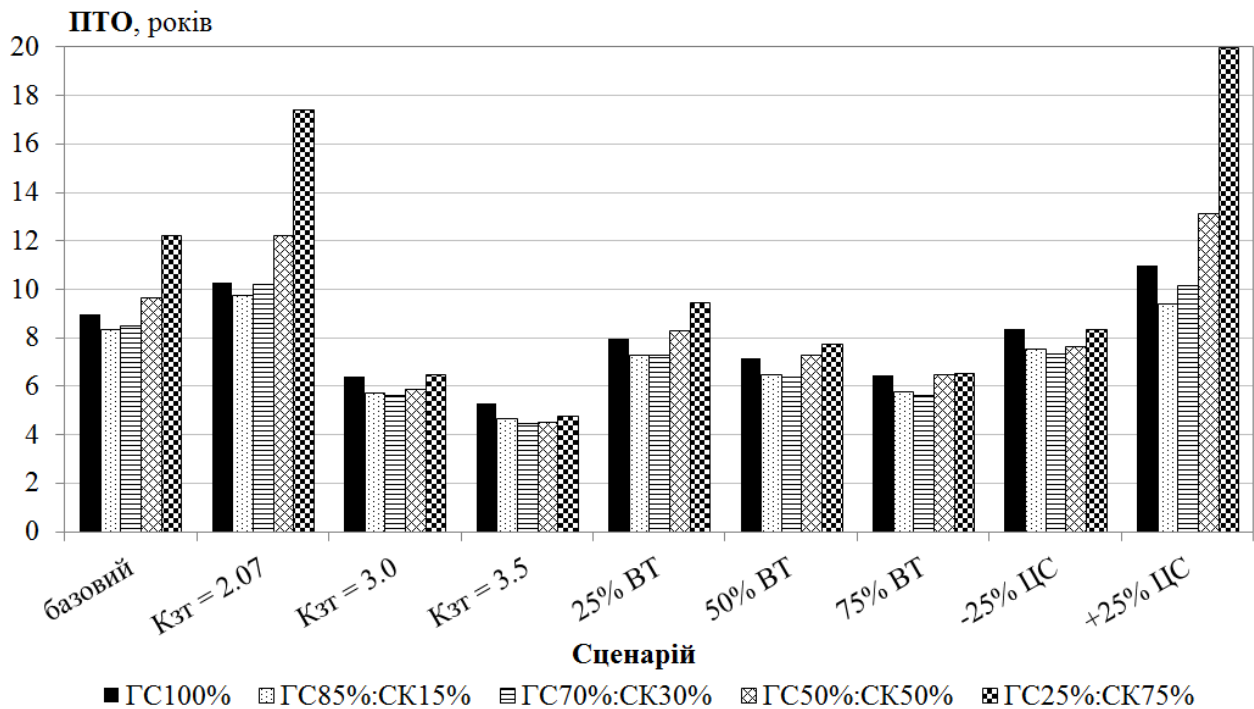


Рис. 12. Терміни окупності проектів виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи при різних економічних сценаріях

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджено та обґрунтовано метод підвищення ефективності виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи. За результатами роботи можна зробити такі основні висновки:

1. Використання силосу кукурудзи для інтенсифікації процесу метанового бродіння та збільшення валового виробництва біогазу в Україні є виправданим з технологічної та енергетичної точок зору.
2. Зі збільшенням частки силосу кукурудзи в суміші з гнойовими відходами пропорційно збільшується питомий вихід біогазу та CH_4 на одиницю свіжої маси, разом з тим зменшується питомий вихід біогазу та CH_4 на одиницю маси органічної речовини. Додавання силосу кукурудзи до гнойових відходів підвищує швидкість виходу CH_4 кратно від 1,4 (15% СОР СК) до 2,0 (75% СОР СК).
3. Процес метаногенезу при збільшенні співвідношення маси органічної речовини субстрату до клітинної маси бактерій помітно пригнічується, що проявляється в збільшенні періоду адаптації бактерій, а при значеннях такого показника вище 25-30 гСОР/г_{к.м.} не відбувається взагалі.

4. На вихід CH_4 з СК впливають вид гібриду кукурудзи, внесення добрив, стадія стиглості при зборі урожаю. Виявлено, що збільшення співвідношення C:N в органічній речовині СК призводить до зниження питомого виходу CH_4 . При вирощуванні вітчизняних гібридів кукурудзи на 1 га землі потенціал виробництва CH_4 складає від 3,7 до 5,7 тис. m^3CH_4 на рік, і є порівнюваним з закордонними зразками. Найбільш привабливими, серед досліджених, є гібриди Венілія (FAO 220) та Моніка 350 МВ (FAO 350), при внесенні під них добрив.
5. Запропонована методика чисельного дослідження показників виходу CH_4 для біореактора повного змішування проточного типу, з використанням кінетичних параметрів реакції ацетокластичного метаногенезу, які визначаються за результатами дослідження показників виходу CH_4 в періодичному процесі метанового бродіння, показала достатню достовірність результатів і може бути використана при дослідженні інших типів субстратів чи їх сумішей.
6. За результатами числового дослідження встановлено граничні режими роботи CSTR реакторів при сумісному метановому бродінні гнойових відходів та силосу кукурудзи, а також обґрунтовано вибір показників виходу CH_4 в залежності від величини органічного та гідравлічного навантаження реактора.
7. При збільшенні частки силосу кукурудзи в суміші з гнойовими відходами знижуються питомі інвестиційні затрати на 1 кВт встановленої електричної потужності КГУ на біогазі від 17 до 40 %.
8. За умови реалізації лише електричної енергії з біогазу за діючим «зеленим» тарифом 0,1239 євро/кВт·год, з точки зору рентабельності проекту, додавання СК більш, ніж 30% є недоцільним, а додавання 15% СОР СК дозволяє знизити термін окупності проекту на 6,8%, у порівнянні з моно-зброджуванням ГС. Для досягнення ПТО проектів на рівні 5,6-6,5 років величина Кзт повинна бути не меншою 3,0 або частка утилізації надлишку тепла повинна складати не менше 75%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Pranas Baltrėnas, Alvydas Zagorskis, Antonas Misevičius, Jurij Matvejev, Pieter Kucheruk. Biogas and methane output experimental research in periodical bioreactor processing livestock manure and its mixtures // *Ciência e Técnica*. – 2015. –30, №2. – P. 267-280. (*Web of Science, Science Citation Index Expanded (ISI Thomson Reuters)*)

Статті у наукових фахових виданнях:

2. Кучерук П.П. Дослідження кінетичних параметрів при періодичному метановому бродінні суміші гнойових відходів та силосу кукурудзи // *Відновл. енергетика*. - 2016. - №1. - С.73-78.
3. Гелетуша Г.Г., Железная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 1 // *Пром. теплотехника*. – 2015. – 37, №2. – С. 68-76.
4. Гелетуша Г.Г., Железная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 2 // *Пром. теплотехника*. – 2015. – 37, №3. – С. 65-73.

5. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В., Грабовський М.Б. Перспективи виробництва біогазу з сумішей гнойових відходів тваринництва та рослинної сировини в Україні // Пром. теплотехника. – 2013. – 35, №1. – С. 107-113.
6. Гелетуха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Куцый Д.В., Гелетуха А.И. Перспективы производства и использования биогаза в Украине // Пром. теплотехника. – 2013. – 35, №6. – С. 76-82.
7. Гелетуха Г.Г., Матвеев Ю.Б., Кучерук П.П., Ходаковская Т.В., Гелетуха А.И. Анализ необходимости применения в Украине «зеленого» тарифа на электроэнергию, вырабатываемую из биогаза // Пром. теплотехника. – 2012. – 34, №4. – С. 67-74.
8. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В., Гелетуха Г.Г., Морозова Є.В., Перерва Є.С. Дослідження ефективності сумісного зброджування гною свиней та силосу кукурудзи // Механізація, екологізація і конвертація біосировини в тваринництві. – 2011. – 8, №2. – С. 45-53.
9. Гелетуха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В. Перспективи виробництва біогазу в Україні // Відновл. енергетика. – 2011. – №3. – С. 73-77.
10. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В. Дослідження ефективності метаногенезу при анаеробному зброджуванні гною ВРХ з рослинними рештками // Відновл. енергетика. – 2010. – 20, №1. – С.83-89.
11. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Кужель Л.М. Когенераційні технології утилізації біогазу станцій анаеробного зброджування сільськогосподарських відходів // Пром. теплотехника. – 2009. – 31, №4. – С. 98-104.

Тези доповідей:

12. Олейник Е.Н., Кучерук П.П., Плугатар О.А. Отходы сельского хозяйства как источник альтернативной энергии // Труды 6-й Международной научно-технической конференции “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”. – Москва, 2008 – С. 141-145.
13. Кучерук П.П. Критерії оцінювання ефективності біогазових проєктів // Матеріали 7-й Международной конференции “Сотрудничество для решения проблемы отходов”. – Харьков, 2010 – С. 99-100.
14. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Мушинская И.М., Ходаковская Т.В. Оценка потенциала производства биогаза в Украине // Матеріали 7-й Международной конференции “Сотрудничество для решения проблемы отходов”. – Харьков, 2010 – С. 100-101.
15. Матвеев Ю.Б., Кучерук П.П., Плугатар О.А. Состояние и перспективы развития биогазовых технологий в Украине // Тезисы V международной конференции “Проблемы промышленной теплотехники”. – Киев, 2007 – С. 289-290.
16. Georgiy Geletukha, Petr Kucheruk, Yuri Matveev. Status and prospects of biogas energy use in Ukraine // Proceedings of the International Conference “Progress in Biogas – Biogas production from agricultural biomass and organic residues”. – Stuttgart, 2007 – P. 29-34.

Національні стандарти України

17. Газоподібне паливо. Біогаз. Методи відбирання проб: ДСТУ 7509:2014. – [Чинний від 2014-09-16]. – К. : Мінекономрозвитку України, 2015. – 9 с. –

(Національний стандарт України). (РОЗРОБНИКИ: О. Григорович, Г. Голуб, С. Драгнєв, В. Дубровін, О. Дубровіна, Г. Забарний, Б. Кочірко, С. Кудря, П. Кучерук, Ю. Матвєєв, В. Поліщук, В. Таргоня, В. Тимошук)

Науково-методичні рекомендації

18. Методика узагальненої оцінки техніко-досяжного енергетичного потенціалу біомаси / Дубровін В.О., Голуб Г.А., Драгнєв С.В., Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Матвєєв Ю.Б., Кучерук П.П., Кудря С.О., Забарний Г.М., Маслюкова З.В. – К.: Тов. «Віол-принт», 2013. – 25 с.

АНОТАЦІЯ

Кучерук П.П. Підвищення ефективності виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів з силосом кукурудзи. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії. Інститут технічної теплофізики Національної академії наук, Київ, 2016.

Дисертацію присвячено дослідженню ефективності сумісного метанового бродіння гнойових відходів з силосом кукурудзи, обґрунтуванню та вибору раціональних з технологічної та економічної точок зору режимів роботи біогазових станцій.

Експериментально досліджено вплив додавання різної частки силосу кукурудзи до гнойових відходів та вплив початкової концентрації органічної речовини на показники виходу CH_4 в процесі періодичного метанового бродіння, а також потенціал виробництва CH_4 з деяких вітчизняних сортів кукурудзи.

Запропоновано адаптований метод визначення кінетичних параметрів процесу метаногенезу на основі експериментальних даних про вихід та склад біогазу в процесі періодичного метанового бродіння та використання їх для числового дослідження показників виходу CH_4 при роботі проточного біореактора.

Виконано техніко-економічну оцінку рентабельності проектів виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи в умовах України.

Ключові слова: біогаз, метанове бродіння, кінетичні параметри, силос кукурудзи, гній.

АННОТАЦИЯ

Кучерук П.П. Повышение эффективности производства биогаза путем совместного метанового сбраживания навоза с силосом кукурузы. Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.08 – преобразование возобновляемых видов энергии. Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена исследованию эффективности совместного метанового сбраживания навоза с силосом кукурузы, обоснованию и выбору рациональных с

технологической и экономической точек зрения режимов работы биогазовых станций.

Экспериментально исследовано влияние добавления силоса кукурузы к навозу, а также начальной концентрации органического вещества на показатели выхода CH_4 в процессе периодического метанового брожения, а также потенциал производства CH_4 с некоторых отечественных сортов кукурузы.

Предложен адаптированный метод определения кинетических параметров процесса образования метана на основании экспериментальных данных об объеме и составе биогаза и использование их для числового исследования показателей выхода CH_4 при работе проточного биореактора.

Выполнена технико-экономическая оценка рентабельности проектов производства биогаза путем совместного метанового сбраживания навоза с силосом кукурузы.

Ключевые слова: биогаз, метановое брожение, кинетические параметры, силос кукурузы, навоз.

ABSTRACT

Kucheruk P.P. Improving the efficiency of biogas production by co-digestion of manure with maize silage. The manuscript.

The thesis for scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.14.08 – the transformation of the renewable energy sources. Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the study of efficiency of anaerobic co-digestion of manure with maize silage, justification and choice of the rational regimes of biogas plant operation from technological and economical points of view.

It was experimentally studied the influence of the addition of different share of maize silage to manure as well as the influence of initial organic matter concentration in reactor on the yield of biogas and methane while digesting periodically. Potential of methane generation from few domestic varieties of maize was investigated.

The modified method for the evaluation of kinetic parameters of methanogenesis based on the yield of methane in periodical process, as well as the method of evaluation of methane yield indicators when digesting in continuous stirred tank reactor with the use of the evaluated kinetic parameters were offered.

Feasibility studies of biogas production from maize silage and manure in Ukraine were conducted.

Key words: biogas, anaerobic digestion, kinetic parameters, maize silage, manure.