УДК 662.767.2

Боднар Л. А.
Заворотний В.І.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МЕТАНОВОГО БРОДІННЯ ШЛЯХОМ КОФЕРМЕНТАЦІЇ ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА ТА РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено вплив балансування співвідношення вуглецю до азоту (C/N) на технологічні та енергетичні параметри біогазової установки під час сумісного зброджування гною великої рогатої худоби та силосу зернових культур. За допомогою математичного моделювання розраховано оптимальну частку високовуглецевого рослинного коферменту, необхідну для усунення дисбалансу поживних речовин та запобігання інгібуванню процесу сполуками аміаку. Визначено раціональні конструктивні та технологічні параметри роботи метантенка в мезофільному режимі для переробки утвореної суміші. Показано, що застосування коферментації забезпечує синергетичний ефект, підвищує питомий вихід біогазу та дозволяє стабільно генерувати значні обсяги електричної й теплової енергії на базі когенераційної установки.

Ключові слова: біогазова установка; коферментація; гній великої рогатої худоби (ВРХ); силос зернових культур; співвідношення вуглецю до азоту (C/N); органічна суха речовина (VS); когенерація; енергетична ефективність.

Abstract

This study investigates the impact of balancing the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio on the technological and energy parameters of a biogas plant during the co-digestion of cattle manure and cereal silage. Through mathematical modeling, the optimal proportion of a high-carbon plant-based co-substrate was calculated to correct nutrient imbalances and prevent process inhibition caused by ammonia compounds. Rational design and operational parameters for the digester operating under mesophilic conditions to process the resulting mixture were determined. It was established that co-digestion yields a synergistic effect, significantly increasing specific biogas production and enabling the stable generation of substantial amounts of electrical and thermal energy via a cogeneration unit.

Keywords: biogas plant, co-digestion, cattle manure, cereal silage, carbon-to-nitrogen ratio (C/N), volatile solids (VS), cogeneration (CHP), energy efficiency

Вступ

Традиційне монобродіння (зброджування лише одного виду сировини, наприклад, чистого гною або кукурудзяного силосу) на біогазових установках (БГУ) має суттєві технологічні та економічні обмеження, які знижують рентабельність біогазової установки. При використанні лише одного виду сировини бактерії часто стикаються з несприятливими умовами середовища. Окремий субстрат рідко має ідеальне співвідношення вуглецю до азоту (оптимальне значення C:N становить 20:1–30:1) [1, 2]. Зокрема, тваринні стоки мають C/N на рівні 12:1–15:1, що під час анаеробного розкладання призводить до накопичення вільного аміаку (NH_3). Як зазначено в [3], субстрати з низьким співвідношенням C/N містять відносно високі концентрації аміаку, що перевищують концентрації, необхідні для росту мікробів, і пригнічують анаеробне розщеплення. При цьому знижується питомий вихід метану.

Для збільшення виходу біогазу та забезпечення стабільності мікробіологічного процесу перспективним напрямком у сучасній світовій практиці є анаеробна коферментація – спільне зброджування тваринних відходів із високовуглецевими рослинними косубстратами (силосом зернових культур, кукурудзяним силосом, подрібненою соломою, харчовими відходами, тощо) [3 – 4]. Додавання рослинної біомаси дозволяє одночасно вирішити кілька інженерних завдань: оптимізувати вологість субстрату в реакторі, підвищити концентрацію доступної органічної сухої речовини (VS) та вирівняти співвідношення C/N до оптимального діапазону.

В роботі [4] досліджено сумісну коферментацію гною ВРХ, свиней та харчових відходів. Показано, що максимальний синергетичний ефект становить 1,22 [4].

В роботі [5] вказано , що попередня обробка кукурудзяної соломи 2% NaOH, що спільно зброджена з гноєм великої рогатої худоби, призводить до вищого виходу метану на 25,4-32,01% порівняно з необробленими субстратами.

В умовах сучасних енергетичних викликів для України розвиток біогазових технологій набуває стратегічного значення для зміцнення енергетичної безпеки держави та заміщення імпортного природного газу. В зв'язку з вищенаведеним, обрана тема дослідження є актуальною та має важливе практичне значення.

Мета роботи – дослідити вплив балансування співвідношення вуглецю до азоту (C/N) на технологічні та енергетичні параметри БГУ за умов сумісного зброджування гною великої рогатої худоби (ВРХ) та силосу зернових культур.

Основна частина

У вітчизняній інженерній практиці хімічний склад біомаси традиційно розраховують відносно загальної сухої речовини (TS), що вносить похибку через врахування мінеральної золи. У даній роботі, відповідно до європейських стандартів, розрахунок елементного складу (C та N) проведено на органічну суху речовину (VS – Volatile Solids). Для моделювання обрано комплекс тваринницької ферми на 1400 голів ВРХ (сумарний вихід гною – 59,4 т/добу). Початковими даними, необхідними для розрахунку є: добова маса свіжої сировини; вологість сировини; частка органічної сухої речовини в сухій речовині; масова частка вуглецю в органічній сухій речовині (VS), масова частка азоту в органічній сухій речовині (VS). Співвідношення C/N рідкого гною ВРХ становить ~14:1, що створює ризик інгібітування процесу сполуками аміаку. Оптимальним рівнем беремо C/N = 20:1.

Математичне моделювання елементного балансу показало, що для підняття показника C/N до 20:1 на кожну 1 тонну свіжого гною ВРХ необхідно вносити 0,0645 тонни силосу зернових культур (вологість 65%, вміст вуглецю становить 48% від VS). Для досліджуваної ферми добова потреба в коферменті становить 3,83 т/добу.

Суміш із загальною масою 63,23 т/добу направляється в біореактор, що працює в мезофільному режимі (температура 37–38 °C, час утримання сировини τ = 20 діб). Необхідний корисний об'єм метантенка становить 1265 м³. Добова генерація газу становить 3362 м³/добу.

За умови використання когенераційної установки з електричним ККД 38% та тепловим ККД 42% (з урахуванням власних потреб системи), БГУ забезпечує стабільну електричну потужність на рівні 319 кВт. Добове виробництво чистої електричної енергії становить 7665 кВт·год, а корисного тепла – 5043 кВт·год/добу.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що для оптимізації співвідношення C/N з 14:1 до 20:1 при переробці 59,4 т/добу гною ВРХ необхідно додавати 3,83 т/добу силосу зернових (0,0645 т на 1 т гною). Реалізація такого режиму коферментації в мезофільному реакторі об'ємом 1265 м³ забезпечує добовий вихід біогазу на рівні 3362 м³ та стабільну генерацію 319 кВт електричної потужності (7665 кВт·год/добу електроенергії та 5043 кВт·год/добу теплової енергії).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Friehe J., Weiland P., Schattauer A. Guide to Biogas: From Production to Use. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2010. 232 p. URL: https://energypedia.info/images/4/46/Guide_to_Biogas-_From_Production_to_Use.pdf (дата звернення: 16.11.2026).
2. C/N ratio in anaerobic digestion: why 20–30 is the optimal range. URL: https://smallops.eu/en/c-n-ratio-anaerobic-digestion/ (дата звернення: 16.11.2026).
3. Effects of Temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) Ratio on the Performance of Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure, Chicken Manure and Rice Straw: Focusing on Ammonia Inhibition / X. Wang, X. Lu, F. Li, G. Yang. *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9, no. 5. Art. e97265. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0097265 (дата звернення: 16.11.2026).
4. Gahyun Baek, Danbee Kim, Jinsu Kim, Hanwoong Kim and Changsoo Lee.Treatment of Cattle Manure by Anaerobic Co-Digestion with Food Waste and Pig Manure: Methane Yield and Synergistic Effect https://pdfs.semanticscholar.org/8c32/8da3dc70a2964a51e0cfd2807c009edd691c.pdf (дата звернення: 16.11.2026).
5. Hidalgo-Sánchez, V.; Behmel, U.; Hofmann, J.; Borges, M.E. Enhancing Biogas Production of Co-Digested Cattle Manure with Grass Silage from a Local Farm in Landshut, Bavaria, through Chemical and Mechanical Pre-Treatment and Its Impact on Biogas Reactor Hydraulic Retention Time. Sustainability 2023, 15, 2582. https://doi.org/10.3390/su15032582 (дата звернення: 16.11.2026).

Боднар Лілія Анатоліївна, к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики ВНТУ. e-mail: Bodnar06@ukr.net

Заворотний Вадим Ігорович, студент гр. ТЕ-24 мсб, ФБЦЕІ, vadim06032000@icloud.com

Bodnar Lilia, Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Bodnar06@ukr.net.

Zavorotnyi Vadym , student, vadim06032000@icloud.com