

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

А. І. Чміль, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: a.chmil@ukr.net

Анотація. Ефективним і перспективним способом утилізації гною є анаеробне зброджування в біогазових установках. При зброджуванні, особливо в термофільному режимі, екскременти тварин значною мірою знезаражуються, гине патогенна мікрофлора, втрачає схожість насіння бур'янів і крім того, виділяється біогаз, утилізація якого дозволяє отримати додаткову енергію. Цей шлях утилізації гною за умов поступового виснаження і здороження традиційних джерел набуває особливого значення. Оскільки зброджування здійснюється в закритих спорудах, повністю ізольованих від оточуючого середовища, усувається можливість поширення інфекцій і газів з неприємним запахом та попадання необробленого гною в ґрунт, ґрунтові і підземні води. У результаті розкладання органічних речовин у збродженому продукті збільшується доля біогенних елементів, більша їх частина переходить в легкозасвоювані рослинами мінеральні речовини, а втрати азоту не перевищують 3-5 %.

Для визначення характеру газовиділення, глибини мінералізації органічної речовини залежно від режимно-конструктивних параметрів, а також з метою розробки на основі отриманих залежностей технологічних схем анаеробної обробки та утилізації відходів тваринницьких підприємств розроблена експериментальна установка.

Теоретичною основою математичного моделювання і прогнозування роботи біоенергетичних установок є рівняння матеріального балансу, зв'язане з швидкостями біохімічних реакцій і дебітами потоків. Виведення рівняння матеріального балансу можливе за наявності інформації про гідравлічні характеристики біоенергетичних реакторів, від яких залежать умови проведення, обмеження та кінцеві результати процесу. Крім того, необхідні також дані про швидкості протікання біохімічних реакцій, вплив на них умов середовища і робочі параметри.

Ключові слова: органічні відходи, анаеробне зброджування, енергетична ефективність

Актуальність. Відомо, що процес анаеробної ферментації є складним багатостадійним процесом біологічної конверсії органічних речовин, що здійснюється за участю декількох тісно зв'язаних між собою груп мікроорганізмів і

протікає в певній послідовності. На першій стадії складні органічні сполуки (жирні кислоти, протеїни, вуглеводні) в результаті ферментаційного гідролізу розщеплюються до більш простих сполук (мономерів, амінокислот). Цей етап розкладання здійснюється гідролітичними бактеріями, такими як *Bacillus*, *Bacteroides* тощо. На другій стадії прості сполуки піддаються дії кислотоутворюючих бактерій (наприклад, *Bacteroides ruminicola*) з утворенням ще більш простих речовин - летких жирних кислот (ЛЖК), спиртів, аміаку, вуглекислого газу і водню, які служать енергетичним та конструктивним субстратом для метаногенеруючих бактерій. Заклучна стадія анаеробного розкладання органічних речовин здійснюється метаноутворюючими бактеріями. На цій стадії, яка отримала назву етапу алкалічної газифікації, за строго анаеробних умов і відсутності світла метаноутворюючі бактерії (такі, наприклад, як *Methanobacterium omelianskii*), використовуючи кінцеві продукти біохімічних перетворень речовин мікроорганізмів кислотної стадії зброджування, відновлюють вуглекислий газ у метан з поглинанням водню. Ці бактерії відрізняються дуже низькою швидкістю росту (час подвоєння деяких видів - 200-300 год) і чутливістю до умов зовнішнього середовища.

Метаноутворюючі бактерії поширені в природі, в рубці (першому відділі шлунку жуйних тварин), а також у товстому кишечнику людини.

Важливо відзначити, що в ході метанового зброджування зберігається до 83 % енергії зброджуваної глюкози. Це свідчить, що метаногенез є найефективнішим в енергетичному відношенні шляхом трансформації енергії органічної речовини в паливо.

Для нормального протікання процесу анаеробного розкладання тваринницьких відходів необхідно створити оптимальні умови життєдіяльності бактерій. На створення цих умов впливають такі фактори: властивість сировини, температура живильного середовища, навантаження на біореактор за органічними речовинами, рН середовища, анаеробні умови, тривалість зброджування, способи та ефективність перемішування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині вітчизняними і зарубіжними

вченими досягнуті великі успіхи в імобілізації мікроорганізмів на різних носіях, розробленні і мають практичне застосування так звані анаеробні реактори другого покоління, які дозволяють значно підвищити концентрацію

мікроорганізмів у реакторі і забезпечують ефективне очищення стоків у дуже широкому діапазоні концентрацій (БПК₅ 0,3-100 г/л). При цьому час обробки становить від 4 до 48 год. Кількість мікроорганізмів, які виносяться із зброджуваною масою, можна значно зменшити при застосуванні електрофізичних методів фіксації. Пропускаючи електричний струм густиною від 0,002 до 0,4 А/м² площі електроду через зброджувану масу перед операцією завантаження-вивантаження метантенка протягом 40-60 хв можна фіксувати колонії мікроорганізмів на інертних носіях, які розміщуються навколо електродів, і запобігати їх видаленню з метантенка [1].

Мета дослідження – оцінка і аналіз енергетичної ефективності процесу анаеробного зброджування органічних відходів.

Матеріали та методи дослідження. Для здійснення процесу анаеробного зброджування на практиці використовують різні технологічні схеми, від простих малогабаритних фермських установок до великих промислових підприємств з переробки гною в біогаз, які умовно можна поділити на низьконавантажувані і виськонавантажувані реактори та установки другого покоління. Схема з низьконавантажуваним реактором реалізована в найбільш поширених біогазових установках типу "Габор" (КНР) та "Дормаштадт" (Німеччина) і складається з герметичної ємкості, заповненої відходами. Пристрої для підігрівання і перемішування відсутні. Основним недоліком такого типу біореакторів є їх низька ефективність. Вихід біогазу при тривалості зброджування 40 і більше діб, становить 0,3-0,5 л/л реактора за добу. Установки такого типу набули широкого розповсюдження в країнах Південної і Східної Азії [3].

У біоенергетичних установках другого покоління, реалізованих в установках систем Енбом (Фінляндія), Біосистем (Швеція), Клаухан (Данія), UASB (Нідерланди), для інтенсифікації процесу зброджування передбачається фазова сепарація з виділенням кислої фази бродіння в самостійний ступінь зброджування

або застосовується іммобілізація мікрофлори.

Результати досліджень та їх обговорення. Дослідження процесу зброджування з використанням фазової сепарації та іммобілізації мікрофлори здійснюється на установці, технологічну схему якої наведено на рис. 1. Гній певної вологості після попереднього подрібнення надходить у перший ступінь біоенергетичної установки 3, де в термофільному режимі здійснюється кисле бродіння з виділенням гідролізного газу. Після закінчення стадії гідролізу субстрат насосом 10 закачується у другий ступінь БЕУ 8, де відбувається переважно метанове бродіння субстрату.

Реактор другого ступеня складається з трьох циліндричних секцій, що входять одна в одну. У верхній зоні всіх трьох циліндрів встановлені іммобілізаційні сітки з завантаженим шунтезитом 19, на якому у вигляді біоплівки утримуються метаноутворюючі бактерії. Субстрат у другий ступінь БЕУ надходить через нижню зону центральної секції, піднімається вгору, проходить через іммобілізаційну зону і переливається в середню секцію. Тут він знову проходить через іммобілізаційну зону і через нижній щілинний отвір потрапляє в крайній циліндр реактора. Піднімаючись угору, субстрат у третій раз проходить через іммобілізаційну зону і витискається з метантенка через вивантажувальний трубопровід. Такий шлях проходження субстрату в реакторі не тільки підсилює метаноутворення та інтенсивне розкладання органічної речовини, але і виключає попадання на вихід необробленого гною[2].

З другого ступеня БЕУ ефлюент надходить у рекуперативний теплообмінник 2 для підігрівання нової порції гною.

Біогаз, утворений у другому ступені БЕУ, проходить через конденсатозбирач 13 і накопичується в газгольдері 15. З газгольдера біогаз потрапляє в карбюраторний двигун 20, переведений на газ (карбюратор замінено на змішувач), призначений для приводу генератора 21 і виробництва електроенергії.

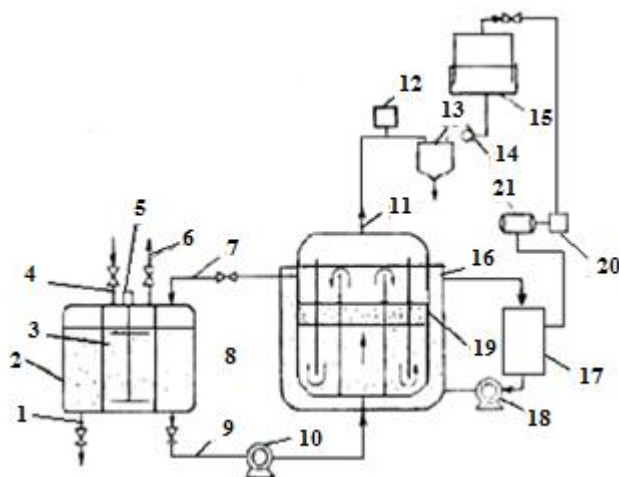


Рис. 1. Схема біоенергетичної' установки для двоступінчатого анаеробного зброджування тваринницьких відходів:

1 - вивантажувальний патрубок; 2 - рекуперативний теплообмінник; 3 – перший ступінь БЕУ; 4 - завантажувальний патрубок першого ступеня БЕУ; 5 – механічна мішалка з електроприводом; 6 - газовідвідний патрубок першого ступеня; 7 - вивантажувальний трубопровід другого ступеня; 8 - другий ступінь БЕУ; 9 – вивантажувальний трубопровід першого ступеня; 10, 18 - насос; 11 - газовідвідний патрубок другого ступеня; 12 - газовий лічильник; 13 - конденсатозбирач; 14 - зворотний клапан; 15 - газгольдер; 16 - водяна сорочка; 17 - проточний електрооводонагрівач; 19- іммобілізаційна сітка з завантаженням шунтезитом; 20 - газовий двигун; 21 - генератор.

При розрахунку біоенергетичної установки, що використовуються для анаеробної обробки та утилізації відходів тваринницьких підприємств, необхідно встановити зв'язок між концентрацією органічних речовин на вході в біореактор S_0 і виході з нього S , часом перебування гною в біореакторі (τ) і концентрацією мікроорганізмів X при фіксованій температурі T_0 , тобто функцію:

$$S = f(X, \tau, S_0, \alpha_1, \alpha_2 \dots, \alpha_n) \quad (1)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ - коефіцієнти математичної моделі, що описують залежність швидкості розкладання органічних речовин у гної від їх концентрації.

У загальному випадку S не обов'язково знаходиться явно, і тоді маємо:

$$F(S, S_o, X, \tau, T, \alpha_1, \alpha_2 \dots, \alpha_n) = 0. \quad (2)$$

Очевидно, що хороша математична модель має забезпечувати достатньо мале відхилення розрахункового значення концентрації від вимірюної в експерименті $S_{\text{експ}}$ у широкому діапазоні вимірювань параметрів τ, S_o, X, T_o . Таким чином, якщо є серія експериментальних точок $(\tau, X, S_o, S, T(i))$, де $i=1, 2, \dots, n$ - порядковий номер експерименту, то для вибраної моделі величина

$$\Phi = \sum_{i=1}^N (S_i^{\text{експ}} - S_i^{\text{роз}})^2 \quad (3)$$

повинна прямувати до мінімуму при певних значеннях констант.

З двох моделей, які дають однакову похибку при визначенні концентрації S , слід надавати перевагу найбільш простій (з меншою кількістю коефіцієнтів). Тому про ступінь адекватності моделі судять за величиною:

$$\Phi^* = \frac{\Phi}{N-K} = \frac{1}{N-K} \sum_{i=1}^N (S_i^{\text{експ}} - S_i^{\text{роз}})^2, \quad (4)$$

де K - кількість коефіцієнтів, або за величиною дисперсії

$$\sigma = \sqrt{\Phi^*}. \quad (5)$$

Величина Φ^* являє собою середньоквадратичне відхилення, а дисперсія σ має смисл абсолютної похибки при визначенні концентрації S .

При значному діапазоні змін $S_{\text{експ}}$ про адекватність моделі експерименту більш правильно судити за величиною

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{1}{N-K} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_i^{\text{експ}} - S_i^{\text{роз}}}{S_i^{\text{експ}}} \right)^2}, \quad (6)$$

яка є відносною похибкою при визначенні концентрації S . Пошук мінімуму σ і σ^* може служити загальним визначенням коефіцієнтів у моделі.

Основним показником, що характеризує роботу біореактора, є його продуктивність, яка визначається швидкістю розкладання органічної речовини мікроорганізмами Γ і в математичній формі виражається рівнянням Міхаеліса-Ментен:

$$r = \frac{r_m S_o}{k_m + S_o}, \quad (7)$$

де k_s - константа Міхаеліса-Ментен; S_0 - концентрація субстрату; r_m - максимально можлива швидкість реакції.

Від швидкості протікання біохімічних реакцій залежить тривалість обробки, яка забезпечує потрібну мінералізацію органічної речовини і є основним показником стабільності збродженого осадка.

Тривалість обробки найчастіше визначається як гідравлічний час знаходження зброджуваного субстрату в біореакторі, або як час знаходження в біореакторі твердої частки, який дозволяє враховувати поряд з часом обробки органічної речовини "вік" активного мулу. Крім того, тривалість обробки може бути врахована через величину навантаження на споруду L , виражену як кількість субстрату (ХПК або БПК), що надходить на 1 літр біореактора за добу. Показник навантаження дозволяє враховувати концентрацію у вихідному матеріалі органічної речовини, що робить його більш універсальним при описанні біологічних процесів. Взаємоз'вязок між навантаженням на споруду і гідравлічним часом знаходження субстрату в біореакторі, вираженим через дозу завантаження $D = 100/H$ (де H – тривалість зброджування), визначається за формулою

$$L = \frac{(100-w)(100-3)D}{1000}, \text{ г/л добу}, \quad (8)$$

де w - вологість вихідного субстрату, % ; 3 - зольність вихідного субстрату, %.

З метою врахування якісних характеристик субстрату, що знаходиться в біореакторі, було запропоновано замінити в рівнянні Міхаеліса-Ментен швидкість споживання субстрату величиною питомої швидкості росту мікроорганізмів:

$$\mu = \frac{\mu_m S_0}{k_s + S_0}, \quad (9)$$

де k_s - константа насичення, еквівалентна k_m ; μ_m - максимальна швидкість росту мікроорганізмів.

Отримане при цьому відоме рівняння Мано, незважаючи на його велику універсальність, не враховує величину відмирання біомаси при інгібуванні процесу. Більш повною є модель Чена-Хашімото, яка базується на такому рівнянні:

$$\mu = \mu_m \left(\frac{S/S_o}{k + \frac{1+k/S}{S_o}} \right), \quad (10)$$

де k - кінетична константа.

Максимальна швидкість росту мікроорганізмів залежить від температури процесу і в діапазоні 10-60 °C може бути виражена так:

$$\mu_m = 0,013 T - 0,129, \quad (11)$$

де T - температура субстрату в біореакторі, °C.

Для практичного використання дуже зручною є універсальна формула Чена-Хашімото, яка дозволяє визначити вихід біогазу залежно від типу субстрату та характеристик біореактора:

$$V_s = (B_o S_o / \theta) (1 - k / (\theta \mu_m - 1 + k)), \quad (12)$$

тут V_s - питомий добовий вихід метану, м³/м³ біореактора; B_o - граничний вихід метану за добу з 1 кг органічної речовини, м³/добу; S_o -концентрація органічної речовини на вході, кг/м³; θ - повного обміну рідини в біореакторі, діб.

Базуючись на значному експериментальному матеріалі, Чен і Хашімото запропонували також формули для обчислення k :

$$\text{для гною ВРХ, } k = 0,8 + 0,0016 e^{0,06 S_o} \quad (13)$$

$$\text{для свинячого гною } k = 0,5 + 0,0043 e^{0,091 S_o}$$

Відповідно до отриманих даних, збільшення вологості гною сприяє більшій мінералізації органічних речовин, виходу біогазу, крім цього, підвищується енергетична віддача одиниці сухої речовини. Проте, одночасно збільшуються енергетичні витрати на підігрівання зростаючого об'єму маси, її транспортування та утилізацію.

Висновки і перспективи. Аналіз численних експериментальних даних, проведених на лабораторних установах показує, що при будь-яких режимах роботи установок і використанні різної сировини найбільш ефективним з точки зору мінералізації органічної речовини і отримання біогазу є двостадійний процес з імобілізацією мікрофлори.

Список використаних джерел

1. Новітні технології біоенергоконверсії: монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетука, [та інш.]. Київ: Аграр Медіа Груп, 2010. 326 с.
2. Чміль А. І. Енергетична ефективність і екологічна безпека замкнутих еколого-біотехнічних систем в тваринництві: монографія. Київ: ЦК «Компринт», 2015. 163 с.
3. Чміль А. І. Дослідження енергетичної досконалості біотехнічних систем у тваринництві. Науковий вісник НУБіП України, 2015. Вип. 209, ч.2. С.58-63.

References

1. Blyum, J. B., Geletuha, G. G. (2010). Novitni tehnologii bioenergokonversii: monografiya [The latest technologies of bioenergy conversion.] Kyiv; Agrar Media Grup, 326.
2. Chmil, A. I. (2015). Enerhetychna efektyvnist i ekolohichna bezpeka zamknutykh ekoloho-biotekhnichnykh system v tvarynnystvi [Energy efficiency and environmental safety of closed ecological and biotechnical systems in animal husbandry]. Kyiv.: TsK «Komprynt», 163.
3. Chmil, A. I. (2015). Doslidshennya energetichnoi doskonalosti biotekhnichnih system u tvarinnosti [Research of energy perfection of biotechnical systems in animal husbandry]. Naukoviy visnik NUBiP Ukraini, 209 (2), 58-63.

ENERGY EFFICIENCY PROCESS OF ANAEROBIC FERMENTATION OF ORGANICS WASTE

A. Chmil

Abstract. *Anaerobic fermentation in biogas plants is an effective and promising method of manure disposal. During fermentation, especially in the thermophilic mode, animal excrement is largely disinfected, pathogenic microflora dies, weed seeds lose their germination and, in addition, biogas is released, the utilization of which allows to obtain additional energy. This way of utilization of manure under the conditions of gradual depletion and increase in the price of traditional sources acquires special importance. Since fermentation is carried out in closed facilities, completely isolated from the surrounding environment, the possibility of the spread of infections and gases with an unpleasant smell and the ingress of untreated manure into the soil, ground and underground water is eliminated. As a result of the decomposition of organic substances in the fermented product, the share of biogenic elements increases, most of them turn into mineral substances easily absorbed by plants, and nitrogen losses do not exceed 3-5%.*

An experimental installation was developed to determine the nature of gas release, the depth of mineralization of organic matter depending on the regime and design parameters, as well as with the purpose of developing, based on the obtained dependencies, technological schemes for anaerobic treatment and waste disposal of animal husbandry enterprises.

The theoretical basis of mathematical modeling and forecasting of the operation of bioenergy plants is the material balance equation related to the rates of biochemical reactions and flow rates. The derivation of the material balance equation is possible if

there is information about the hydraulic characteristics of bioenergy reactors, which depend on the operating conditions, limitations, and final results of the process. In addition, data on the rate of flow of biochemical reactions, the influence of environmental conditions and operating parameters on them are also necessary.

Key words: *organic waste, anaerobic fermentation, energy efficiency*