

Ульяницкий А.В. Обоснование минимальных затрат энергии при горизонтальном пневмотранспортировании сыпучих материалов: Дисс. ... канд. тех. наук. — Одесса, 1993.4. Hayes J.W., Read A.R, Bradley M.S.A. Economics of Pneumatic Conveying Systems. A case study. — Powder handling & processing, 1993, v. 5. — № 1. — P. 7—11. 5. Чальцев М.Н. Исследование и разработка малогабаритных камерных питателей // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. — Кременчуг, 2000. — Вып. .1. — № 8. — С. 325—329. 6. Чальцев М.Н., Чернецкая Н.В. Быстродействующие затворы для малогабаритных камерных питателей // Вісник Східно-Українського держ. університету, Науковий журнал. Технічні науки. Серія транспорт. — 2000. — № 7. — С. 218—221. 7. Пат. 45804 UA, МКИ В65G53/04. Спосіб пневматичного транспортування дрібнофракційних сыпучих матеріалів / М.М.Чальцев, Б.Є.Бугаєв. — UA. — № 2001074787; Заявл. 10.07.01; Опубл. 15.04.2002. Бюл.№ 4, 2002.

УДК 621

Й. Мисак, Я. Гнатишин, Т. Шумський
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра теплотехніки та теплових електричних станцій

ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ АНАЕРОБНОГО ПЕРЕРОБЛЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

© Мисак Й., Гнатишин Я., Шумський Т., 2004

The detail survey of anaerobic digestion technology is made in the article. The prospects of new technical solutions, which appeared recently, are shown. The analysis, structuring and classification of bioenergetic plants taking into account experience of the leading countries is laid out.

Постановка проблеми. Анаеробний спосіб перероблення органічних відходів набув широкого поширення у всьому світі [1]. Передовсім це пов'язано з тим, що технологія анаеробного розкладу, крім високоефективних екологічно чистих органічних добрив, дає змогу отримувати біогаз (горючу суміш газів) як альтернативне висококалорійне паливо, та забезпечувати умови охорони довкілля. Анаеробний процес проходить в біоенергетичних установках (БЕУ), які є складною системою технологічних процесів як фізико-хімічної, так і біологічної природи (процеси, пов'язані з життєдіяльністю мікроорганізмів). Постійний прогрес технології анаеробного розкладу приводить до розвитку нових технічних рішень в цій сфері, зокрема, одноємнісні типи біореакторів замінюють на багатоємнісні, одностадійні схеми процесу — на двостадійні, поряд із технологічними схемами з високою одиничною потужністю застосовують модульні установки тощо [2]. Швидкий прогрес технології вимагає аналізу і узагальнення наявних знань про процес, виконання класифікації для системного підходу в подальших дослідженнях.

Аналіз останніх досліджень. Згідно з вітчизняною і закордонною літературою [1, 2, 3, 4, 5] БЕУ поділяють за декількома основними ознаками. В першу чергу БЕУ класифікують за типами технологічних схем (характеризують процеси завантаження—вивантаження субстрату):

- а) із періодичною схемою (періодичної дії);
- б) із проточною схемою (умовно (квазі) безперервної дії);
- в) із біореактором-збірником.

За продуктивністю БЕУ класифікують на:

- а) малі (об'єм біореактора до 50 м³);
- б) середні (50—200 м³);
- в) великі (понад 200 м³).

За метою будівництва БЕУ можна розділити на:

- а) побутові (сімейного типу);
- б) пілотні (дослідницькі);
- в) промислові.

За типом субстрату БЕУ класифікують на:

- а) сільськогосподарські;
- б) комунальні;
- в) БЕУ з перероблення відходів переробної галузі АПК;
- г) змішані.

Основним технічним елементом (вузлом) БЕУ є біореактор (ферментер, метантенк), тому основні технічні відмінності між ними передовсім впливають на технічні рішення, застосовані у побудові біореактора і навпаки.

Задачі досліджень. Вдосконалення технології та розширення сфер застосування БЕУ вимагають структуризації і класифікації отриманих результатів досліджень і досвіду для раціональнішого підходу до проектування БЕУ на сучасному етапі, а також до подальших досліджень. Тому завданням роботи є глибше дослідження типів БЕУ, їх різновидів і технічних особливостей, а також детальне висвітлення нових технічних рішень і їх впливу на подальший розвиток технології.

Технології анаеробного перероблення органічних відходів

БЕУ із періодичною схемою

БЕУ із періодичною схемою працюють так: біореактор наповнюється свіжим субстратом (аж до 90 %) і незначною частиною перебродженого субстрату (близько 10 %). Упродовж 3 (до 4) тижнів відбувається анаеробний розклад при сталій температурі. В цей час біогаз із субстрату виділяється найінтенсивніше, потім продуктивність різко падає. Вихід біогазу в таких установках звичайно не є сталим. Для забезпечення більш-менш сталого виходу експлуатують паралельно щонайменше 2 біореактори. Зрозуміло, що коефіцієнт використання біореакторів є нижчим порівняно із проточною схемою за рахунок втрат часу на завантаження-вивантаження, встановлення оптимального режиму роботи БЕУ. Як зазначається в [2], внаслідок нижчого коефіцієнта використання біореакторів необхідний робочий простір для систем періодичної дії приблизно вдвічі більший, ніж для проточних схем за всіх інших однакових умов. Крім того, періодичну схему не можна експлуатувати без газгольдера через необхідність покривати нерівномірний вихід біогазу, а також володіти запасом біогазу для заповнення робочого простору біореактора, що звільнятиметься при вивантаженні (в іншому випадку важко підтримати анаеробні умови в біореакторі).

БЕУ періодичної дії внаслідок згаданих недоліків майже не знаходять застосування, за винятком окремих випадків для переробки малих об'ємів сировини.

БЕУ із проточною схемою

БЕУ із проточною схемою працюють за принципом безперервної дії. Щоденно біореактор наповнюється наявним субстратом. Така сама кількість перебродженого субстрату забирається через перелив і надходить в збірник. За такої схеми вихід біогазу зберігається практично на постійному рівні і кількісно, і якісно.

Для будівництва біореакторів використовуються різні матеріали, тому за їх видом поділяють на:

- а) залізобетонні;
- б) сталеві;
- в) пластикові.

За розміщенням біореактора вони бувають:

- а) надземні;
- б) підземні.

В країнах з теплим кліматом, де поширена технологія анаеробного бродіння (Індія, Китай, країни карибського басейну тощо), біореактори, як правило, будують підземними. В Західній Європі, де БЕУ будують переважно для обслуговування великих об'ємів сировини, біореактори найчастіше розміщують над землею.

Форма біореактора теж розглядається як критерій класифікації БЕУ. За формою біореактори поділяються на:

- а) кубічні (паралелепіпед);
- б) циліндричні (горизонтальні або вертикальні);
- в) сферичні;
- г) інші складніші форми (еліптичні тощо).

Найширше застосовують циліндричні біореактори через простоту виготовлення, порівняно низьке співвідношення поверхні до об'єму і інші переваги.

Використання різних систем перемішування дає змогу здійснити поділ БЕУ на:

а) БЕУ з механічним перемішуванням:

- 1) ручний привід [2];
- 2) електричний привід:
 - система із міксером (пропелером) і центральною трубою або без неї;
 - система із лопатками розміщеними по осі;
 - система із широкими крилами (лопастями) розміщеними по осі;

б) БЕУ з гідравлічним перемішуванням:

- 1) з використанням відцентрових pomp;
- 2) з використанням гідроелеваторів [2].

Використання елеваторів, однак, пов'язане з низьким ККД, ускладненою конструкцією біореактора, а також вимагає чіткого дотримання співвідношення форми і розмірів камери і напрямку струмину рідини.

в) БЕУ з пневматичним перемішуванням;

Застосування пневматичного перемішування за допомогою біогазу [2] вимагає додаткових затрат на компресію біогазу. Крім того, під час експлуатації виникає небезпека утворення плаваючої плівки, яка призводить до проблем з виходом біогазу і відповідно веде до гальмування анаеробного бродіння.

Одним з найважливіших параметрів БЕУ є температура. За температурним режимом БЕУ класифікують на:

- а) психрофільні (20—25 °С);
- б) мезофільні (30—35 °С), інколи виділяють термотолерантні (40°С);
- в) термофільні (50—55 °С).

Можна класифікувати БЕУ за характеристиками (особливостями) системи теплопостачання:

- а) підведення тепла тільки поза біореактором (покриття потреби в енергії біореактором здійснюється ззовні, тобто поза ним);
- б) підведення тепла як поза, так і в біореакторі;
- в) підведення тепла тільки в біореакторі за допомогою ТА біореактора (принципово підведення тепла в біореакторі може здійснюватись двома способами, якщо
 - 1) ТА міститься всередині;
 - 2) ТА міститься ззовні (теплова сорочка, зміювик тощо))[3];

В загальному БЕУ із проточною схемою широко застосовують в США, Західній Європі, зокрема в Німеччині, Австрії, Швейцарії, Данії, Швеції тощо.

БЕУ із біореактором-збірником

Внаслідок загострення проблем, пов'язаних з забрудненням довкілля, зокрема ґрунтових вод, в різних європейських країнах набрали чинності закони і директиви, які вимагали об'єм збірників гною і інших сільськогосподарських відходів збільшити настільки, щоб забезпечувалось їх зберігання протягом 3—6 місяців до внесення на поля. Звідси з'явилась ідея сконструювати так звані біореактори-збірники, робочий простір яких одночасно слугував би і для зберігання перебродженого субстрату. Відбір перебродженого субстрату з біореакторів-збірників здійснюється на початку вегетативного періоду, коли він, як біодобриво, використовується на полях. У будівництві БЕУ часто застосовується принцип біореактора-збірника із підземним виконанням. Така схема мож-

лива для побудови сільськогосподарської БЕУ як на існуючих фермах, так і на фермах, що проєктуються разом із БЕУ.

Існують декілька модифікацій організації процесу анаеробного розкладу, про які варто згадати. Використання проточної схеми з максимальними технічними спрощеннями призвело до виникнення ставків, наповнених відходами сільського господарства і закритих пластиковими матеріалами, під якими збирається біогаз. Вихідний субстрат (переважно гній) самопливом надходить в ставок, а еквівалентна кількість перебродженого видаляється з нього. Такі системи за рахунок своєї простоти і відповідних низьких затрат останнім часом широко застосовують в усьому світі. Доказом служить і той факт, що така БЕУ збудована в Україні на свинофермі компанії Агро-Овен (с. Єленівка, Магдалинівського району, Дніпропетровської області). Різновидом такої системи є ставки-лагуни, що працюють за принципом біореактора-збірника. Тобто весь вихідний субстрат зберігається в них аж до вегетативного періоду, коли вноситься на поля. Така система є значно більшою за розмірами порівняно із стандартними БЕУ і працює в психрофільному, рідко мезофільному режимі. Такі ставки дають змогу використовувати і дуже розбавлені відходи, коли вміст твердих речовин є меншим, ніж 3 %.

Окремо слід виділити і БЕУ, де відбувається анаеробне бродіння твердих субстратів. Це стосується нерозрідженого гною тварин, рослинних решток, твердих органічних відходів, що утворюються на переробних підприємствах АПК, в комунальному секторі, побутового сміття. Дослідження можливості енергетичного використання такого роду відходів за допомогою анаеробного бродіння інтенсифікувались останнім часом. Сьогодні вже в багатьох країнах світу функціонують промислові БЕУ з перероблення різних твердих органічних відходів.

Для бродіння таких відходів розроблено спеціальні технології. Принципово вони також поділяються на: одноступеневі (одностадійні) і двоступеневі. При одноступеневому процесі біореактор конструюється так, щоб переробляти матеріал з вмістом сухої речовини до 45 % шляхом сухого бродіння в БЕУ із протічною схемою. Іншим варіантом одноступеневої системи є біореактор, в якому тверді відходи транспортуються за допомогою рідкої фази всередині перфорованого каналу. При використанні двоступеневої системи органічні кислоти гідролізом за допомогою підведеної води звільняються і вимиваються з твердих відходів, а потім в високоефективних біореакторах (біофільтрах, біореакторах з киплячим шаром) перетворюються на біогаз, а відпрацьована вода очищається і знову подається в процес. Такі системи для переробки твердих відходів є ще більш високотехнологічними і ставлять вищі вимоги до техніки, аніж системи збродження розчинених органічних відходів. Однак для сільськогосподарських підприємств, де найчастіше переробляється гній і інші порівняно прості субстрати, концепція бродіння твердих відходів при сучасному стані техніки прогнозовано може принести найбільші переваги (просте будівництво, незначні затрати на техніку). Найважливішими механічними вузлами при бродінні твердих відходів є системи завантаження і розвантаження субстратів. На відміну від рідкого субстрату робочий простір біореактора, що заповнюється твердими відходами, неможливо перемішувати. Це, своєю чергою, веде до утворення мертвих зон, зменшення корисного об'єму і часу перебування субстрату в біореакторі, що негативно впливає на вихід біогазу. Крім цього, в біореакторі можуть утворюватися "корки", які перешкоджатимуть нормальному проходженню субстрату [4].

Використання технології анаеробного розкладу для збродження сортового побутового сміття має великі перспективи і вже сьогодні можна знайти приклади комерційного застосування. Спроби утилізувати побутові відходи з використанням цієї технології розпочались ще перед II світовою, а протягом останніх 15 років було розроблено декілька типів таких систем, кожна з яких має переваги і недоліки. Використання анаеробного розкладу для збродження сортованих побутових відходів вимагає вирішення багатьох технічних проблем, включаючи високу експозицію. Було розроблено декілька систем, які мали на меті зменшити об'єм біореактора і витрати на енергозабезпечення БЕУ і тим самим підняти економічні показники. Ці системи використовували як зовнішнє, так і внутрішнє перемішування, за допомогою біогазу чи лопаток і працювали із відходами з концентрацією твердих частинок (сухої речовини) більше ніж 30 % [5].

Актуальною також є проблема закриття і утилізації сміттєзвалищ, де накопичилась значна частина відходів органічного походження. Відомий спосіб їх консервації дає змогу застосувати анаеробний розклад і отримувати біогаз.

Як уже відзначалось, біогаз можна отримувати не тільки з сільськогосподарських відходів, але й з практично всіх біогенних (органічних) решток. В усьому АПК (цукрові, консервно-заготівельні заводи, м'ясокомбінати тощо) існують багато галузей, в результаті роботи яких утворюється велика кількість відходів, які можуть утилізуватись методом анаеробного бродіння і водночас забезпечувати себе енергією у вигляді біогазу. Як правило, згадані відходи АПК розбавляються водою і утворюють стічні води. Для того, щоб при великих об'ємах цих стічних вод не будувати біореактори значних розмірів, використовують високопродуктивні модифікації, в яких субстрат перебуває значно менший час, ніж, наприклад, в звичайних сільськогосподарських установках. Цього ефекту досягають за рахунок підвищення концентрації бактерій на 1 м³ біореактора. Для утримання в біореакторі бактерій від виносу з перебродженням субстратом існують декілька можливостей:

- Використання так званого фільтра, який розміщується всередині біореактора і заповнюється малими кульками, кільцями чи іншими металевими або пластмасовими формами, створює додаткові поверхні взаємодії мікроорганізмів і субстрату у вигляді плівки кількамільметрової товщини. Крім того бактерії використовують додаткову поверхню для закріплення на ній і менше вимиваються з біореактора. Такий фільтр дає змогу здійснити збродження в середньому за 1 добу [4].

- Використання принципу киплячого шару, в якому бактерії виростають і утворюють великі групи, які седиментуються і повертаються знову в біореактор. Стічна вода протікає через цей "гранулят" з бактерій (бактеріальний гранулят), який звичайно має велику активну поверхню (наприклад, UASB—процес), і отже, можна досягти дуже короткого терміну перебування субстрату в біореакторі — менше ніж один день.

- Використання принципу вирощування бактерій на піску із інтенсивним його перемішуванням.

- Повернення або регенерація бактерій, які з нього вийшли, в біореактор за допомогою їх седиментації. Це дає змогу збільшити кількість бактерій в об'ємі біореактора [4].

Для сільськогосподарських відходів і, передовсім, для гною тварин використання біореактора-фільтра або принципу киплячого шару істотно ускладнюється тим, що тверді частинки можуть забивати фільтр, а також перешкоджати утворенню киплячого шару.

Удосконалення технології призвело до створення складних технологічних схем, що передбачають постадійний розклад субстрату згідно з розглянутою вище інформацією. За цим критерієм БЕУ також можна класифікувати на:

- а) одностадійні (одноступеневі);
- б) двостадійні чи багатостадійні.

Дослідження, виконані багатьма авторами (І.Г. Цайкус, А.І. Цендер, Г. Леттінга, Е.А. Волін, М.Дж. Волін, Дж.Т. Тіелі, С. Гош, М.П. Брайант) довели, що одностадійний процес є "грубою симуляцією комплексної екосистеми". Одностадійний процес не дає змоги мікроорганізмам всіх груп і видів досягати оптимальних швидкостей росту через необхідність збалансування двох найважливіших складових розкладу: процесів утворення кислот і їх утилізації. Сьогодні принципи двостадійного розкладу детально розроблені, що дає змогу впроваджувати їх в практику. Інтенсифікація процесу, яка досягається створенням оптимальних умов для розвитку мікроорганізмів на різних стадіях анаеробного бродіння призводить до пришвидшення розкладу і відповідно зниження експозиції, а також дає змогу краще знищувати патогенну мікрофлору, уникати утворення плівки і зрештою призводить до зменшення капітальних і експлуатаційних затрат на будівництво БЕУ. Однак варто зазначити, що використання двостадійної схеми ускладнює процес і потребує високо-технологічного обладнання, що водночас призводить до можливого зростання затрат на будівництво БЕУ. Тому її застосування можливе, передовсім, для великих промислових БЕУ в комунальному секторі, переробній промисловості, сільському господарстві.

Висновки. Виконане дослідження дало змогу оцінити сучасні тенденції розвитку технології, перспективи різних напрямів її використання. Крім того, в роботі здійснена детальна класифікація БЕУ, яка дає можливість вести подальші дослідження з метою вдосконалення технології та розширення сфер її застосування. На основі огляду технології висвітлено нові технічні рішення та їх можливий вплив на перспективи використання анаеробного розкладу в народному господарстві України.

Сучасні світові тенденції в сфері природокористування і охорони довкілля визначаються поворотом від ліквідації наслідків антропогенного впливу людської діяльності до все активнішого запобігання і усунення причин погіршення стану довкілля. Велика кількість відходів, які накопичувались протягом десятиліть, сьогодні потребують утилізації. Інтенсифікація виробництва вплинула і на галузі, які, на перший погляд, завдають мало шкоди довкіллю: сільське господарство, переробна промисловість тощо. Висока концентрація поглов'я і інші проблеми призвели до того, що забруднення від цих галузей народного господарства є інколи не меншим, ніж від традиційно "брудних" енергетики, транспорту тощо [5]. Протягом останніх десятиліть технологія анаеробного розкладу пройшла новий етап розвитку і сьогодні може розглядатись як один з найефективніших методів утилізації відходів органічного походження. Тому її належне використання повинно розглядатись як важливий інструмент енергетичної та природоохоронної політики держави.

1. Report, *International Conference on biogas, Technologies and Implementation Strategies*, 10—15.01.1990, Pune, India. 2. Семенов И.В. Проектирование биогазовых установок — Суми, 1996. 3. Шумський Т., Якубеня Я., Желих В., Юркевич Ю. Системи теплопостачання ферментеру біогазової установки, Львів, I Міжнародна науково-практична конференція: "Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні" (Львів, травень 2001 р.). 4. Wellinger A., Baserga U., Edelmann W., Egger K., Seiler B. *Biogas-handbuch Grundlagen-Planung-Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*, Verlag Wirz Aarau, 1986. 5. *A short history of anaerobic digestion, USA, 2001.*

УДК 621.182.1

Й. Мисак¹, І. Марчак², Я. Івасик¹,
І. Демчук¹, Н. Лашковська¹

¹Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра теплотехніки і теплових електричних станцій
²МКП "Львівтеплоенерго"

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНІ ПОВЕРХНІ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА В ДОВКІЛЛЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

© Мисак Й., Марчак І., Івасик Я., Демчук І., Лашковська Н., 2004

Article is devoted to determination of heat losses from surface of generator heat. Stated ways of effective determination of these losses.

Вступ. Сьогодні залишаються нерозв'язаними задачі з виявлення конструктивних, експлуатаційних та режимних факторів, що спрямовані на вдосконалення водогрійних котлів та оптимізацію втрат тепла в довкілля для котлів, що експлуатуються в Україні типу КВ-ГМ; ТВГ; КСВ; КСВТ; НИИСТУ; котли Стребеля тощо. Крім того, нині немає єдиної методики з визначення втрат тепла