

АНАЛІЗ БАРБОТАЖНИХ СИСТЕМ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

Скляр Р. В., к.т.н.,

Жмак С.С., магістрант

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені
Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна.*

Ефективний теплообмін у біогазових ферментерах є критично важливим для забезпечення стабільної анаеробної ферментації, однак традиційні системи нагріву, основані на природній конвекції та механічному перемішуванні, не завжди забезпечують рівномірний розподіл температури у всьому об'ємі високо-в'язкого субстрату. У ферментерах часто утворюються холодні і перегріті зони, що уповільнює гідроліз та метаногенез, знижує біогазопродуктивність і збільшує енерговитрати. Механічні мішалки, хоча й покращують перемішування, характеризуються підвищеним енергоспоживанням і зношуванням рухомих частин, особливо при роботі з густими субстратами тваринництва [1]. У таких умовах постає проблема пошуку альтернативних або додаткових методів інтенсифікації теплообміну, здатних ефективно руйнувати прикордонні шари, підвищувати турбулентність і забезпечувати стабільну циркуляцію середовища без значного збільшення енергоспоживання. Одним із перспективних шляхів розв'язання цієї проблеми є застосування барботажних систем, здатних значно покращити теплообмін, проте їх вибір та ефективність залежить від конструкції, типу субстрату та конфігурації ферментера. Це зумовлює необхідність порівняльного аналізу найпоширеніших барботажних систем та обґрунтування оптимальних умов їх застосування.

Ефективний теплообмін у біогазових установках є ключовою умовою стабільної роботи анаеробних реакторів, особливо при використанні мезофільного (35–38 °С) або термофільного (52–55 °С) режимів ферментації [2]. Втрата тепла, нерівномірний розподіл температури субстрату, утворення холодних зон та низька швидкість конвекційних потоків призводять до зниження біогазопродуктивності на 10–25%. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності теплообміну є застосування барботажної інтенсифікації, яка забезпечує покращення теплопередачі між теплообмінною поверхнею та ферментованим середовищем шляхом введення газової фази у вигляді дрібнодисперсних бульбашок.

Барботаж створює інтенсивний рух середовища, збільшує турбулентність і руйнує прикордонні стаціонарні шари, що традиційно є основним опором теплопередачі в густих органічних

субстратах. У ферментерах біогазових установок високої в'язкості, де природна конвекція є недостатньою, барботажний режим значно підвищує коефіцієнт тепловіддачі, збільшуючи його у 1,5–3 рази порівняно зі стандартними схемами циркуляції [3].

Класичні теплообмінники «труба в трубі» або спіральні теплообмінні реєстри, встановлені в нижній частині ферментера, забезпечують локальне нагрівання середовища. Однак без інтенсифікації конвекції відбувається осідання важких фракцій, утворення холодних зон та уповільнення гідролізу. Введення газових бульбашок (біогазу або повітря у попередній змішувальній ємності) дозволяє створити вертикальний потік, що постійно переміщує субстрат уздовж теплообмінної поверхні [4]. Це забезпечує рівномірний розподіл температури, знижує ризик локального перегріву та сприяє більш повній ферментації органічної маси.

Сучасні біогазові установки застосовують кілька схем барботажної інтенсифікації. Перша - центральна барботажна колона, розміщена у внутрішній зоні ферментера. Газ подається знизу, піднімається по колоні та створює циркуляційні потоки по всьому об'єму реактора. Друга -бокова барботажна система, яка забезпечує локальний рух біля теплообмінників, особливо коли вони розташовані вздовж стінок. Третя - комбінована схема, що одночасно покращує перемішування та теплообмін у ферментері, підвищуючи однорідність субстрату та зменшуючи потребу в механічному перемішуванні [5].

Величезною перевагою барботажної інтенсифікації є зниження енергоспоживання. На відміну від механічних мішалок, газові інжектори не мають рухомих частин у зоні ферментера, що мінімізує ризики зношення, спрощує обслуговування та зменшує витрати електроенергії у 2–4 рази. Крім того, барботаж може використовувати відсепарований біогаз із низьким тиском, що систематично надходить у реактор, забезпечуючи повну інтеграцію системи в технологічний цикл.

Дослідження показують, що застосування барботажної інтенсифікації сприяє підвищенню теплової однорідності середовища, що є критичним для активності мезофільних та термофільних груп мікроорганізмів [5,6]. Рівномірність температури зменшує ймовірність процесного стресу, стабілізує роботу реактора та підвищує вихід біогазу. У великих промислових ферментерах барботаж дозволяє скоротити час нагріву реактора після завантаження на 20–30%, що має значний економічний ефект, особливо в зимовий період.

Система барботажу також позитивно впливає на структуру органічної маси: газові бульбашки руйнують агломерати соломи, гною чи відходів птахівництва, покращуючи доступ ферментативних бактерій до субстрату. Це підвищує ступінь розкладу органічної речовини та сприяє збільшенню загальної метанопродуктивності.

Барботажні системи інтенсифікації широко застосовуються в анаеробних біореакторах завдяки їх здатності покращувати теплопередачу, забезпечувати рівномірний розподіл температури та зменшувати потребу в механічному перемішуванні. У практиці сучасних біогазових установок найбільшого поширення набули *чотири основні типи барботажних систем*: центральні барботажні колони, периферійні (бокові) барботажні інжектори, дифузорні барботажні решітки та комбіновані барботажно-механічні системи. Кожна з них має свої технічні особливості, переваги та обмеження (таблиця 1).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика основних типів барботажних систем

Тип барботажної системи	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Оптимальні умови застосування
Центральна барботажна колона	Вертикальна труба в центрі ферментера подає газ знизу вверху, формуючи інтенсивну циркуляцію	Надійна інтенсифікація теплообміну; добре працює при високій в'язкості; низьке енергоспоживання	Складність монтажу; потреба в балансуванні тиску; складність чистки	Великі ферментери ($\geq 2000 \text{ м}^3$), субстрати з високою в'язкістю
Периферійні (бокові) барботажні інжектори	Газ подається через бокові форсунки навколо теплообмінників	Максимальна тепловіддача на локальних ділянках; зручний доступ; низькі витрати газу	Менша глибина перемішування; можливі застійні зони	Установки з внутрішніми реєстрами теплообміну
Дифузорні барботажні решітки	Газ виходить через сотні-тисячі отворів у решітці на дні ферментера	Найвища площа контакту газ-рідини; дрібнодисперсний барботаж; сильна інтенсифікація теплообміну	Високі вимоги до чистоти газу; можливе забивання; складність очищення	Гомогенні або попередньо подрібнені субстрати
Комбіновані барботажно-механічні системи	Барботаж + мішалки на низьких обертах	Максимальна однорідність; висока ефективність; зниження навантаження на мішалки	Складніша система керування; дорожче	Промислові ферментери $> 3000 \text{ м}^3$, складні багатокомпонентні субстрати

Отже, барботажна інтенсифікація теплообміну є одним із найбільш перспективних і енергозберігаючих методів оптимізації процесів у біогазових установках. Вона поєднує технологічну

простоту, низькі витрати, високу ефективність і можливість інтеграції з існуючим обладнанням.

Список використаних джерел

1. Скляр Р.В., Скляр О.Г. Обґрунтування способу перемішування субстрату для експериментальної біогазової установки. Науковий вісник ТДАТУ. 2020. Вип. 10, т.1. URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/11287/1/06.80_2.pdf

2. Комар А. С. Огляд методів дослідження та оптимізації машинних технологій утилізації відходів тваринництва. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-9>.

3. Скляр О.Г., Скляр Р.В., Комар А. С. Удосконалення конструкції біогазової установки з рекуперацією теплоти збродженої біомаси. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання ТДАТУ*. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 3. С. 62–71 URL: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-3-5>

4. Болтянський, Б., Сиротюк, С., Коробка, С., Стукалець, І. Аналіз методів удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2024, 14(1). <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-6>.

5. Скляр О. Г., Комар А. С. Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. *Праці ТДАТУ: наукове фахове видання*. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С. 104–114. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115.

6. Болтянський Б.В. Аспекти вдосконалення технології виробництва біогазу. *Праці ТДАТУ*. 2024. Вип. 24, т. 1. С. 89–100. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-6>.