

С. П. Пушкін, канд. техн. наук, М. В. Почкай, Д. О. Коваленко  
(НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»),

## ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

*Обґрунтовано раціональні параметри зброджування органічної частини твердих побутових відходів у біореакторі, що забезпечують максимальний вихід біогазу, який використовується в якості енергетичного палива, і заходи захисту при експлуатації біогазової установки.*

**Ключові слова:** побутові відходи; моделювання; перемішування; біогаз; зброджування; мета; заходи захисту.

*Обоснованы рациональные параметры брожения органической части твёрдых бытовых отходов в биореакторе, что обеспечивают максимальный выход биогаза, который используется в качестве энергетического топлива, и мероприятия по защите при эксплуатации биогазовой установки.*

**Ключевые слова:** бытовые отходы; моделирование; перемешивание; биогаз; брожение; мета; мероприятия по защите.

*The rational parameters of fermentation of the organic part of solid domestic waste in a bioreactor are substantiated, which ensures the maximum yield of biogas, which is used as energy fuel, and measures for protection in the operation of a biogas plant.*

**Keywords:** household waste; modeling; bioreactor; mixing; biogas; digestion; temperature; humidity; methane; protection measures.

*Вступ.* Останнім часом завдання поводження з твердими побутовими відходами (далі – ТПВ) набула ще більшої гостроти і значення. Ефективним рішенням цієї задачі є комплексне сортування ТПВ з вилученням утильних компонентів та отримання біогазу в якості енергетичного палива при зброджуванні їх органічної частини у реакторі біогазової установки. Розраховані стехіометричним способом величини емісії біогазу [1] не враховують реальні умови розкладання, відрізняються від значень, отриманих в ході лабораторних випробувань, що може негативно вплинути на реальну оцінку умов безпечної експлуатації біореактора та призвести до нещасних випадків, професійних захворювань працівників, аварійних ситуацій. Тому вибір раціональних параметрів розкладу органічної речовини у біореакторі за результатами математичного моделювання, в якому використовується емпіричні дані

про процеси газогенерації та експериментальних досліджень [2] і розробка заходів для безпечної експлуатації біогазової установки є актуальною науково-практичною задачею.

*Мета роботи.* Визначити раціональні параметри зброджування органічної частини ТПВ в біореакторі, що забезпечують максимальний вихід біогазу, який використовується в якості енергетичного палива, і заходи захисту при експлуатації біогазової установки.

*Результати дослідження.* Для ефективного процесу зброджування органічної сировини в біореакторі необхідно забезпечити: належні анаеробні умови в біореакторі; необхідний температурний режим; правильний час зброджування і своєчасне завантаження і вивантаження сировини; необхідні кислотно-лужний баланс і співвідношення вмісту вуглецю і азоту; правильну вологість сировини; регулярне перемішування.

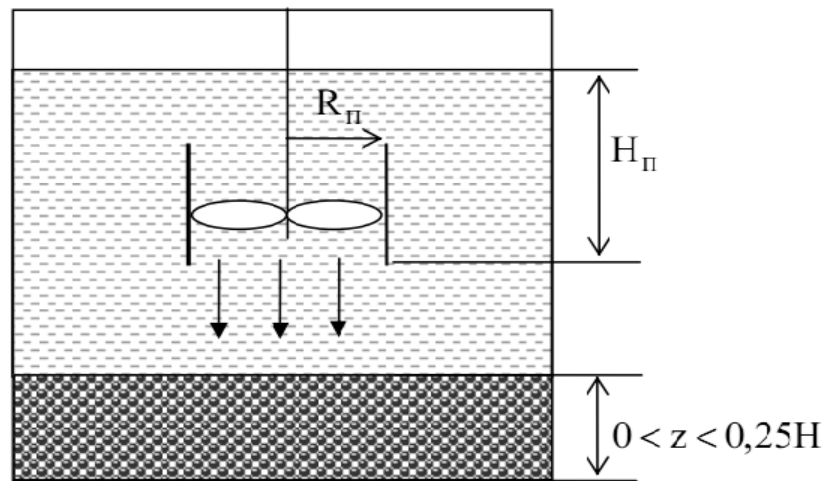
Для визначення раціональних параметрів зброджування органічної частини відходів виконувалось математичне моделювання процесу газогенерації з використанням математичної моделі [3] і методи контрольних об'ємів [4], з урахуванням явища флотації, тобто руйнування плаваючого шару органічної речовини пухирцями газу.

Для моделювання було прийнято, що в місті утворюється 60000 т відходів (300 тис. населення) з такими характеристиками: щільність відходів становить у середньому  $0,19\text{--}0,23\text{ т/м}^3$ ; рН змінюється від 5,0 до 7,5; теплотворна здатність при зміні щільності від  $0,2\text{ т/м}^3$  до  $0,5\text{ т/м}^3$  знижується з 2000 до 940 ккал/кг; вміст активного вуглецю складає 189,55 кг/т; вологість знаходиться в межах 60–85 %; середня температура в реакторі –  $30^\circ\text{C}$ ; час перебування відходів в реакторі – 20 діб; експериментальна установка-реактор циліндричної форми (висота  $H$  – 2 м, радіус  $R$  – 1 м) корисним об'ємом  $6,28\text{ м}^3$ .

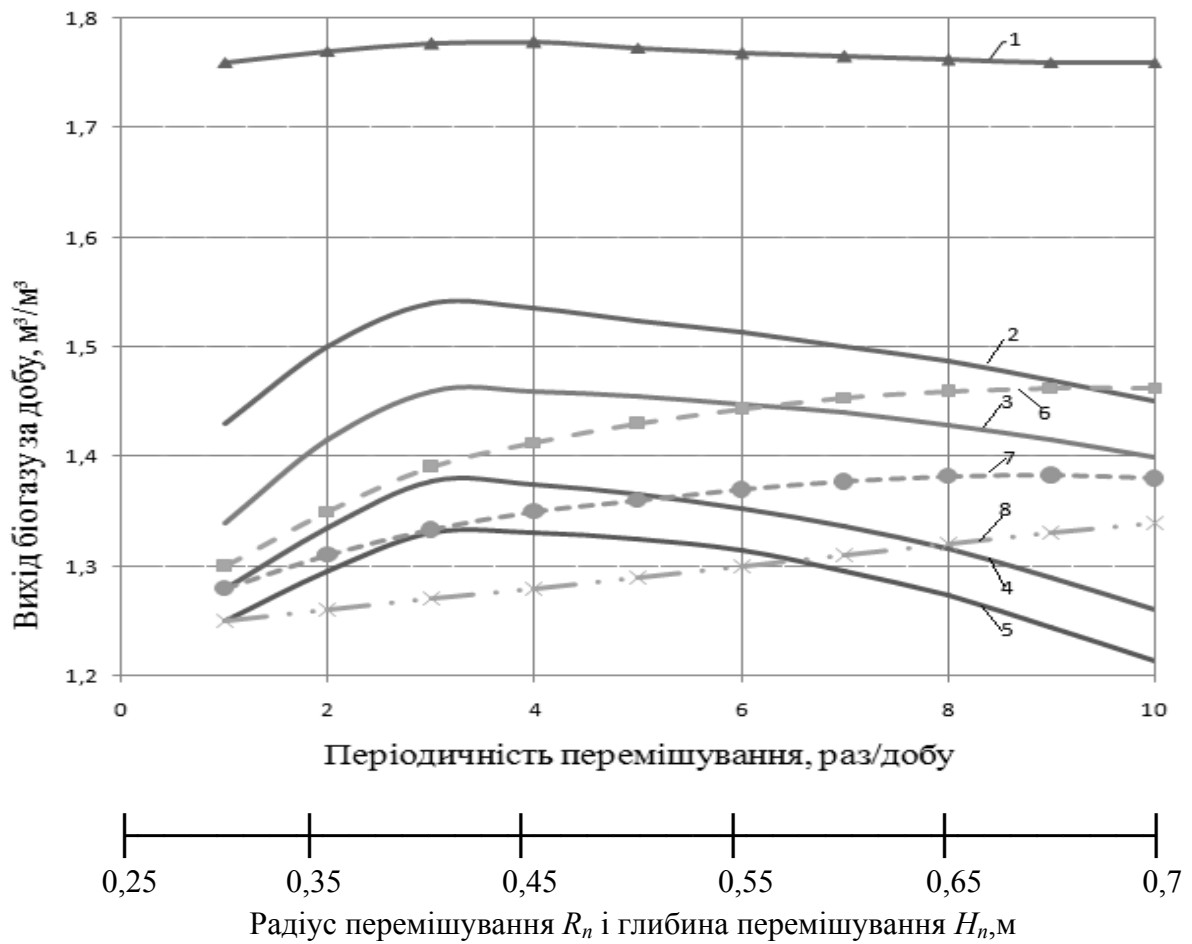
Розглядався механічний спосіб перемішування за допомогою мішалки, яка забезпечує рух рідини вертикально вниз. Радіус перемішуючого пристрою повинен відповідати мінімальному значенню, за умов забезпечення уникнення «застійних зон». Глибина перемішування має верхнє граничне значення, що відповідає товщині плаваючого шару, який би міг утворитися протягом доби без перемішування, нижнє граничне значення відповідає початку зони накопичення шламу, яка розташована в нижній частині реактора на глибині,  $0 < z < 0,25H$  (рис. 1)

Аналіз результатів моделювання вказує на те, що збільшення періодичності перемішування до 3–4 разів на добу є виправданим, оскільки призводить до максимального виходу біогазу  $1,53\text{ м}^3/\text{м}^3$  за добу, і, навпаки, подальше збільшення періодичності з 5 до 10 разів зменшує вихід біогазу за рахунок підвищення часу роботи мішалки (тобто активного руху рідини, коли бактерії не продукують газ) (рис. 2).

Значення питомого виходу біогазу з урахуванням флотації та без урахування цього процесу (ідеальний реактор) відрізняється на 15 %.



**Рис. 1. Спосіб та геометричні характеристики перемішування**



**Рис. 2. Залежності виходу біогазу від періодичності, радіусу та глибини перемішування органічної сировини в біореакторі:**  
**1 – перемішування в ідеальному реакторі; 2 – перемішування з урахуванням флотації; 3 – глибина перемішування 0,6 H; 4 – глибина перемішування 0,4 H; 5 – глибина перемішування 0,35 H; 6 – радіус перемішування 0,5 R; 7 – радіус перемішування 0,4 R; 8 – радіус перемішування 0,3 R**

Тривалість перемішування обґрунтовується виходячи з умов необхідності проходження через зону перемішування такого об'єму рідини, який є еквівалентним об'єму всієї флотованої маси в реакторі, і для умов дослідження дорівнює 20 хв.

Вихід біогазу збільшується при збільшенні глибини  $H_n$  та радіусу  $R_n$  перемішування, досягаючи раціонального значення при  $R_n = (0,4 \div 0,5)R$  і  $H_n = 0,6 H$  (рис. 2).

В результаті проведення експериментальних досліджень, в яких застосовувалася лабораторна установка, що складалася з послідовно з'єднаних біореактора, адсорбера, ротаметра, пробовідбірника, і термостата було встановлено наступне.

При збільшенні вологості бродильної маси знижується концентрація субстрату, що веде до підвищення виходу газу [5]. Так, при зміні вологості від 60 % до 80 % при постійній температурі 40,5°C вихід біогазу збільшується на 18 %.

Підвищення температури з 20°C до 45–50°C призводить до збільшення об'єму газу, але подальший ріст температури до 60°C знижує його вихід (рис. 3).

Збільшення виходу біогазу досягається збільшенням частоти перемішування бродильної маси до 5 діб<sup>-1</sup>; подальше збільшення частоти істотно не впливає на його вихід, при цьому витрати електроенергії підвищуються.

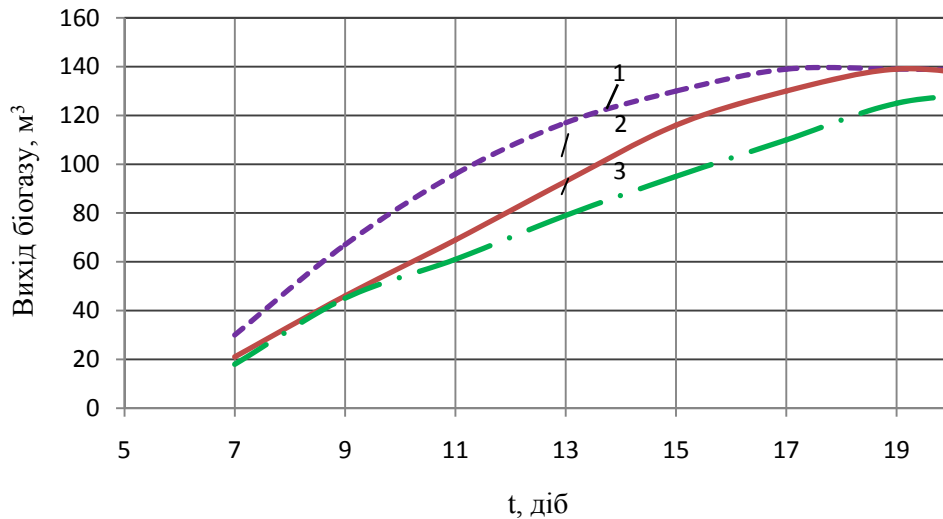
При збільшенні тривалості процесу бродіння вихід біогазу підвищується, і при температурному режимі 40–60°C (термофільний режим) час зброджування великої кількості відходів доходить до 16 діб.

До переваг термофільного процесу зброджування відносяться: підвищена швидкість розкладання сировини і, отже, вищий вихід біогазу, а також практично повне знищення хвороботворних бактерій, які містяться в сировині. Недоліками є: велика кількість енергії для підігріву сировини в реакторі, чутливість до мінімальних змін температури, нижча якість отримуваних біодобрив.

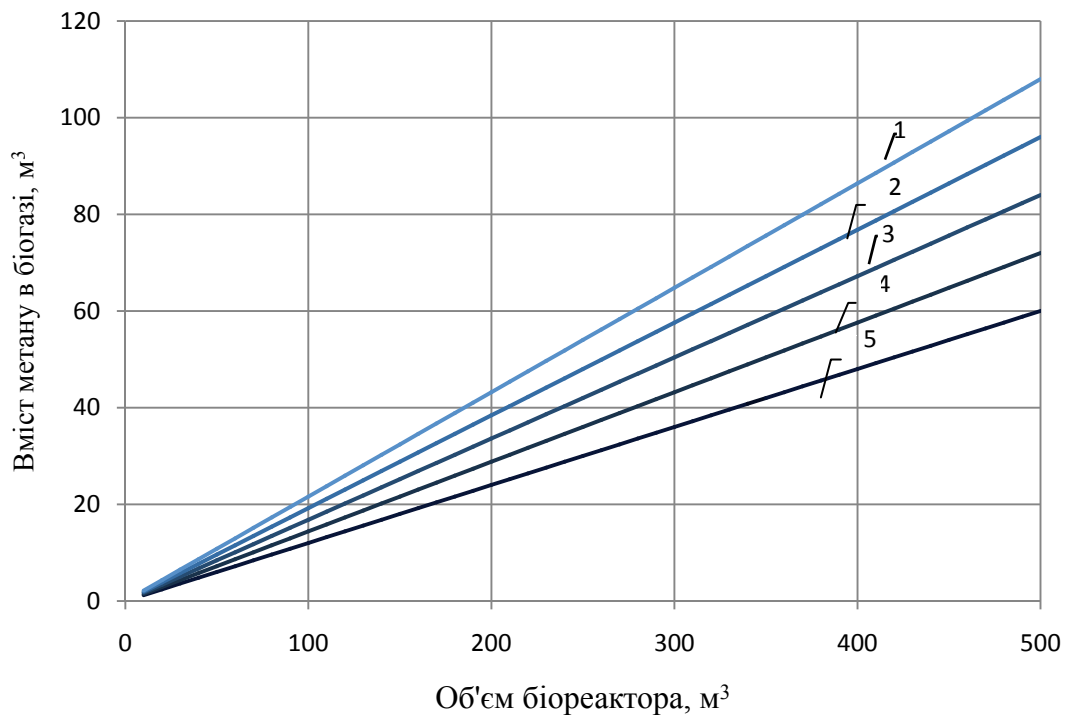
Основними компонентами біогазу є метан (45–75 %), який використовується як енергетичне паливо, та вуглекислий газ (25–55 %), що потрібен як інертний газ для зварювальних робіт у харчовій промисловості тощо.

Збільшення органічної складової у відходах сприяє зростанню вмісту метану в складі біогазу (рис. 4).

Дослідження впливу компонентного складу відходів (білки, жири, вуглеводи) на вміст метану показує, що максимальне його значення 68,7 % досягається при зброджуванні відходів, які складаються переважно з вуглеводів.



**Рис. 3. Залежність виходу біогазу від часу збродження і температури:  
1 – 50°C; 2 – 45°C; 3 – 60°C**



**Рис. 4. Залежність об'єму метану в біогазі від об'єму біореактора та вмісту органічної речовини:  
1 – 0,9; 2 – 0,8; 3 – 0,7; 4 – 0,6; 5 – 0,5**

Процес виділення метану дуже чутливий до змін температури. При термофільному температурному режимі допустимі зміни температури в межах  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  за годину.

Одним з важливих показників, які впливають на процес бродиння сировини, є співвідношення вуглецю С і азоту N в перероблюваній сировині. Якщо співвідношення C/N надмірно велике, то нестача азоту

обмежує процес бродіння, і, навпаки, велика кількість аміаку токсична для бактерій. Вихід біогазу найбільший при рівні співвідношення вуглецю і азоту від 1 до 20. Оптимальне значення рН коливається залежно від сировини в межах від 6,5 до 8,5.

Під час перебування в біореакторі ТПВ в повітрі робочої зони містяться речовини з неприємним запахом (сірководень, аміак, меркаптани тощо). Біологічними шкідливими виробничими факторами є патогенні мікроорганізми (бактерії, пліснява, гриби) та продукти їх життєдіяльності. Основними джерелами санітарної небезпеки є присутність у зброджуваних органічних відходах яєць гельмінтів, бактерій груп кишкової палички та іншої патогенної мікрофлори.

Серед психологічних факторів можна виділити нервово-емоційні перевантаження, монотонність.

Для попередження нещасних випадків і уникнення травматизму, а також виникненню професійних захворювань у працівників передбачені колективні, організаційні, технічні, індивідуальні заходи захисту.

Вдихання біогазу у великих кількостях протягом тривалого часу може викликати отруєння, внаслідок наявності в газі отруйного сірководню. Тому всі приміщення, де стоять прилади, що використовують біогаз, треба регулярно провітрювати. Газові труби повинні постійно перевірятися на витік газу за допомогою мильної емульсії або спеціальних приладів. При цьому застосування відкритого вогню забороняється.

Біогаз у суміші з повітрям в пропорції від 5 % до 15 % за наявності джерела спалаху з температурою 600°C або вище може призвести до вибуху. Відкритий вогонь небезпечний при концентраціях біогазу у повітрі понад 12 % [6]. Забороняється куріння та розведення вогню поблизу установки. При проведенні зварювальних робіт відстань до газового обладнання повинна бути не менше 10 м.

Після зливу сировини з біореактора для проведення ремонту він повинен провітрюватися, так як існує небезпека вибуху суміші біогазу і повітря.

Тиск газу, який подається до газопроводу до місця споживання, не повинен перевищувати 0,15 мПа, а перед газовими приладами має бути не більше 0,13 кг/см<sup>2</sup>.

Внаслідок наявності патогенної мікрофлори для попередження зараження не рекомендується споживати їжу поряд з біогазовими установками.

Технічними засобами нормалізації повітряного середовища приміщень і робочих місць в них передбачається автономна припливно-витяжна вентиляція з механічним імпульсом.

При експлуатації біогазової установки засобами індивідуального захисту є шлангові протигази ПШ-1, ПШ-2 та киснеізолювальний протигаз.

## Висновки

1. Максимальний вихід біогазу і раціональні умови безпечної експлуатації біогазової установки досягаються при періодичності перемішування біомаси до 3–4 разів на добу, максимального значення радіуса перемішування сировини  $R_n = (0,4–0,5)R$ , глибини перемішування  $H_n = 0,6 H$ , збільшення частоти перемішування бродильної маси до 5 діб, вологості до 80 %, температури до 45–50°C, співвідношення вуглецю і азоту від 10 до 20, значення рН від 6,5 до 8,5.

2. Основним компонентом біогазу, який використовується як енергетичне паливо, є метан. Максимальне його значення досягається при зброджуванні відходів, що складаються переважно з вуглеводів.

3. Для попередження вибуху біогазу, нещасних випадків, професійних захворювань у працівників передбачаються використання автономної припливно-витяжної вентиляції з механічним імпульсом, контроль приладів на виток біогазу, регулярне провітрювання приміщень, застосування кисне ізолювальних і шлангових протигазів ПШ-1, ПШ-2.

## Список літератури

1. Ягафарова Г. Г. Разработка матрицы прогнозирования выхода метана в биогазе из твердых бытовых отходов [Текст] / Г. Г. Ягафарова, Л. А. Насырова, А. М. Шаимова // Башкирский химический журнал. – 2007. – Том 14. – № 5. – С. 31–34.

2. Суслов Д. Ю. Получение биогаза в биореакторе с барботажным перемешиванием [Текст]: автореф. ... уч. степени канд. техн. наук : 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий» / Суслов Денис Юрьевич. – Иваново, 2013. – 16 с.

3. Землянка О. О. Математичне моделювання кінетики процесу анаеробного бродіння органічних відходів в ферментаторі біогазової установки [Текст] / О. О. Землянка // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2007. – № 4. – С. 47–52.

4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / С. Патанкар; [пер. с англ.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

5. Эдер Б. Биогазовые установки. Практическое пособие [Текст] / Б. Эдер, Х. Шульц ; [пер. с нем.]. – Zorg Biogas, 1996. – 268 с.

6. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Затвердж. постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999, № 42.

*Дата подання статті до збірника – 24.03.2017  
Рецензент – О. Левченко, д-р. техн. наук*