

ДДТУ. – 2015. – Вип. 2(27). – С.217-222.

4. Гаевая, Л.А. Средства индивидуальной защиты глаз и лица на производстве [Текст] / Л.А. Гаевая. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.

5. Андроньев, С.М. Пылегазовые выбросы предприятий чёрной металлургии [Текст] / С.М. Андроньев, О.В. Филиппев. – М.: Металлургия, 1981. – 244 с.

6. Куприн, А.И. Гидротранспорт стружки [Текст] / А.И. Куприн, А.М. Тихонцов. – М.: Машиностроение, 1978. – 80 с.

7. Огурцов, А.П. Исследование параметров транспорта сыпучих материалов в открытом потоке жидкости [Текст] / А.П. Огурцов, Л.М. Мамаев, А.И. Куприн. – К.: ИСИ МО, 1995. – 505 с.

8. Гасило, Ю.А. Исследование закономерностей перемещения сыпучих материалов по желобам, уложенным с различными уклонами [Текст] / Ю.А. Гасило // Придніпровський науковий вісник. – 1997. - №44 (45). – С.38-43.

9. Куприн, А.И. Зависимость удельной транспортирующей способности от удельной энергии живого сечения потока пульпы [Текст] / А.И. Куприн // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1987. – №8. – С.57-61.

10. Куприн, А.И. Исследование параметров транспортирующего потока пульпы [Текст] / А.И. Куприн // Изв. ВУЗов Горный журнал. – 1989. – №3. – С.24-29.

*Стаття надійшла до редакції 19.11.2016р.*

УДК 628.4.032:662.76

DOI: 10.20535/2079-5688.2017.32.85604

**С.П. Пушкін**, к.т.н., доцент, **М.В. Почкай**, магістр, **Д.О. Коваленко**, студент (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

---

## **ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗБРОДЖУВАННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В РЕАКТОРІ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ**

---

**S.P. Pushkin, M.V. Pochkai, D.A. Kovalenko** (National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»)

### **PARAMETERS JUSTIFICATION OF HOUSEHOLD WASTE FERMENTATION IN BIOGAS REACTOR**

*Обґрунтовані раціональні параметри збродження органічної частини твердих побутових відходів в реакторі біогазової установки, що забезпечують максимальний вихід біогазу, який використовується в якості енергетичного палива.*

**Ключові слова:** побутові відходи; моделювання; біореактор; перемішування; біогаз;

*зброджування; температура; вологість; метан.*

*Обоснованы рациональные параметры брожения органической части твёрдых бытовых отходов в реакторе биогазовой установки, что обеспечивают максимальный выход биогаза, который используется в качестве энергетического топлива.*

**Ключевые слова:** бытовые отходы; моделирование; биореактор; перемешивание; биогаз; брожение; температура; влажность; метан.

*Justified rational parameters of digestion of organic solid waste digester for maximum yield of biogas, which is used as energy fuel.*

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

**Вступ.** Ефективним рішенням поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) є їх комплексне сортування з вилученням утильних компонентів та отримання біогазу в якості енергетичного палива при зброджуванні органічної частини ТПВ у реакторі біогазової установки. Стехіометричний підхід для оцінки кількості та швидкості утворення біогазу не враховує реальні умови розкладання, такі як ступінь аеробної і анаеробної деструкції, поживних обмежень, біологічного інгібування процесу, фізико-хімічних взаємодій [1]. Розраховані даним способом величини емісії перевищують значення, отримані в ході лабораторних випробувань.

Вибір раціональних параметрів розкладу органічної речовини у біореакторі за результатами математичного моделювання, в якому використовуються емпіричні дані про процеси газогенерації та експериментальні дослідження [2], є актуальною науково-практичною задачею.

**Мета роботи.** Визначити раціональні параметри зброджування органічної частини ТПВ в реакторі біогазової установки, забезпечуючих максимальний вихід біогазу, що використовується в якості енергетичного палива.

**Результати дослідження.** Для процесу зброджування органічної сировини в реакторі біогазової установки необхідно забезпечити наступні умови: підтримку анаеробних умов в біореакторі; дотримання температурного режиму; вибір правильного часу зброджування і своєчасне завантаження і вивантаження сировини; дотримання кислотно-лужного балансу; дотримання співвідношення вмісту вуглецю і азоту; вибір правильної вологості сировини; регулярне перемішування.

Для визначення раціональних параметрів зброджування сировини проведено математичне моделювання процесу газогенерації з використанням математичної моделі [3], з урахуванням явища флоатації, тобто руйнування плаваючого шару органічної речовини пухирцями газу.

Структурно математична модель газогенерації (анаеробного бродіння) складається з блоків, які описують гідродинаміку, теплообмін та кінетику в реакторі біогазової установки. Система рівнянь, що описує кінетику в циліндричному реакторі біогазової установки, має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \tau} + \frac{\partial uW}{\partial r} + \frac{\partial vW}{\partial z} + \frac{uW}{r} &= -kWf_h S ; \\ \frac{\partial S}{\partial \tau} + \frac{\partial uS}{\partial r} + \frac{\partial vS}{\partial z} + \frac{uS}{r} &= D_s \left( \frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} \right) + \chi kWf_h S - \frac{\rho_m T_f f_m S SB}{K_s + S} ; \\ \frac{\partial B}{\partial \tau} + \frac{\partial uB}{\partial r} + \frac{\partial vB}{\partial z} + \frac{uB}{r} &= D_B \left( \frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} \right) + Y_i \rho_m T_f f_m S \frac{SB}{K_s + S} - k_d B ; \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\partial uP}{\partial r} + \frac{\partial vP}{\partial z} + \frac{uP}{r} &= 1 - Y_i \rho_m T_f f_m S \frac{SB}{K_s + S} ; \end{aligned} \quad (1)$$

де  $r, z$  – поточні координати;  $u, v$  – радіальна та осьова складові швидкості;  $W$  – концентрація органічної речовини;  $k$  – константа гідролізу;  $k_d$  – коефіцієнт розпаду біомаси;  $S$  – концентрація субстрату – летючих жирних кислот (ЛЖК);  $\chi$  – стехіометричний коефіцієнт видобутку субстрату з органічної речовини;  $B$  – концентрація метаногенних мікроорганізмів;  $P$  – концентрація продуктів метаболізму;  $\rho_m$  – максимальна питома швидкість утилізації ЛЖК;  $K_s$  – константа швидкості, що дорівнює концентрації субстрату, за якої швидкість росту культури дорівнює половині максимальної;  $f_h(S)$  – функція інгібування стадії гідролізу субстратом;  $f_m(S)$  – функція інгібування стадії метаноутворення субстратом;  $D_s$  – коефіцієнт дифузії субстрату;  $D_B$  – коефіцієнт дифузії мікроорганізмів;  $Y_i$  – економічний коефіцієнт виходу одиниці продукту з одиниці біомаси;  $A$  – масова частка метану в біогазі;  $T_f$  – безрозмірна температурна функція для реакцій метаноутворення.

Систему (1) вирішено за допомогою методу контрольних об'ємів [4].

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

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).

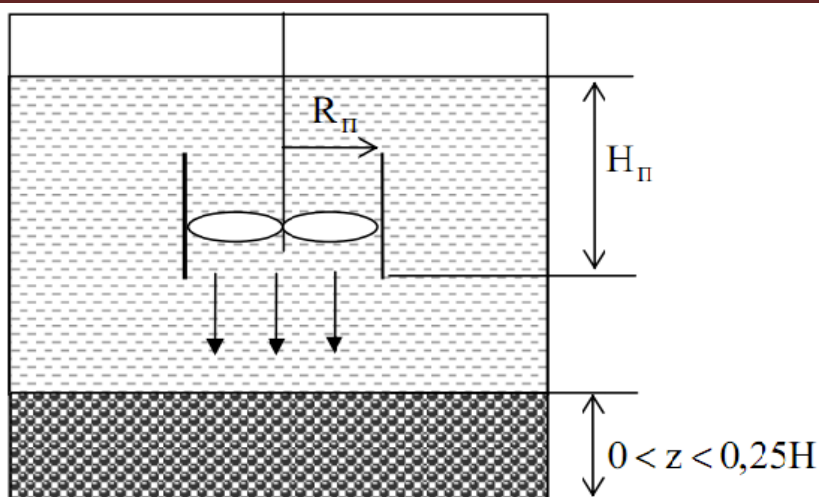


Рис. 1. Спосіб та геометричні характеристики перемішування

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 флоатації та без урахування цього процесу (ідеальний реактор) відрізняється на 15%.

Тривалість перемішування обґрунтовується виходячи з умов необхідності проходження через зону перемішування такого об'єму рідини, який є еквівалентним об'єму всієї флоатованої 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  $H_n=0,6H$  (рис. 2).

Для проведення експериментальних досліджень застосовувалася лабораторна установка, яка складалася з послідовно з'єднаних біореактора, адсорбера, ротаметра і пробовідбірника. Система була поміщена в термостат, що дозволяло варіювати температуру від  $+20^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ . В результаті досліджень було встановлено наступне.

Виявлено регресійні залежності виходу біогазу  $Q$  від температури  $T$ , вологості  $W$ :

$$Q = 0,205T + 0,25W + 0,002TW - 13,7; \quad (2)$$

та від температури, вологості, частоти перемішування біомаси  $n$ , часу зброджування  $t$ :

$$Q = 234,69 + 43,62W - 4,61W^2 + 65,6n - 21,21n^2 - 32,29T - 16,93T^2 + 43,26t - 4,39t^2$$

$$+34,26Wn-2,25WT+84,85Wt+4,25nT+15,87nt-7,5Tt; \quad (3)$$

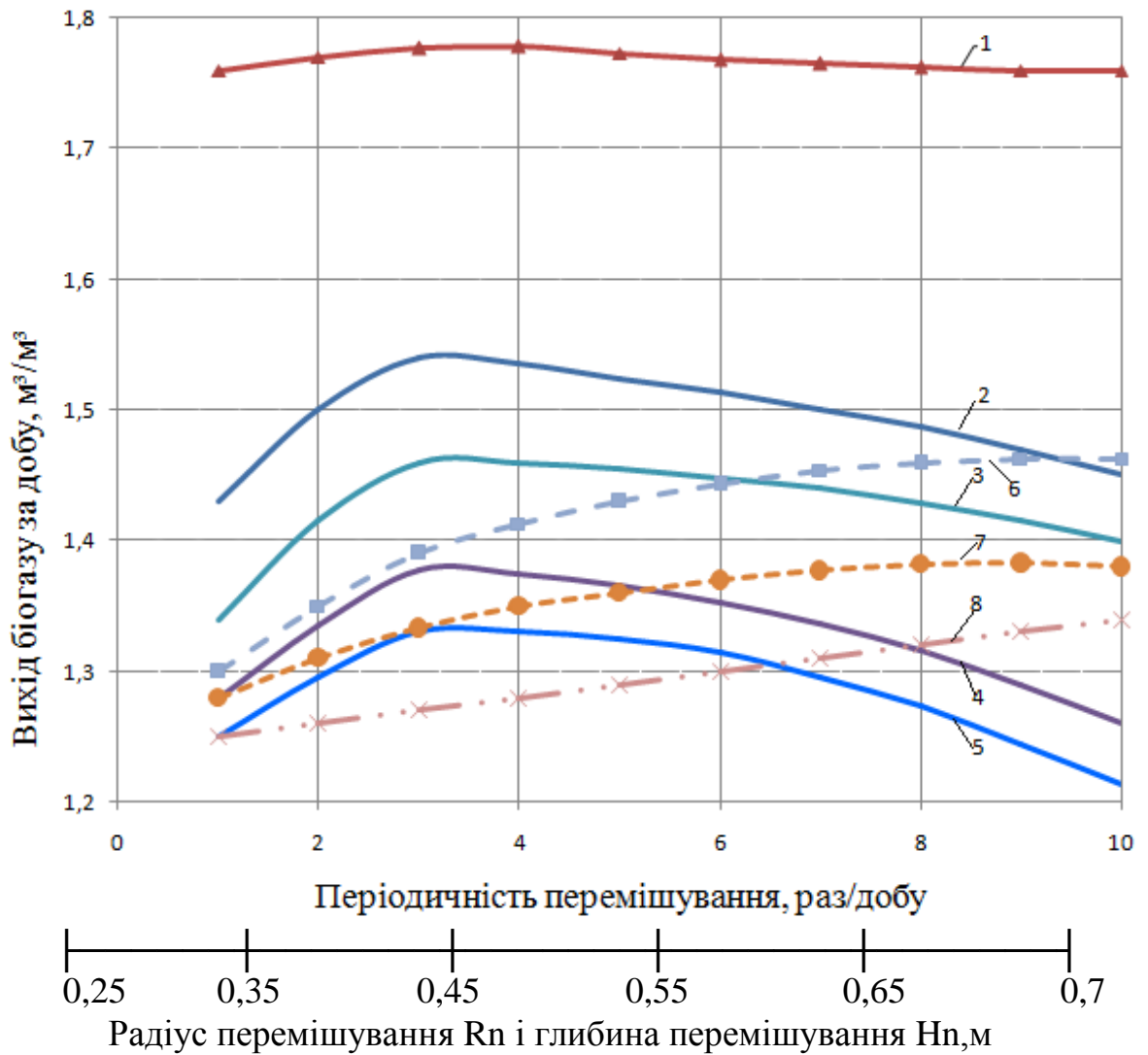


Рис. 2. Залежності виходу біогазу від періодичності, радіусу та глибини перемішування органічної сировини в біореакторі:

- 1 – перемішування в ідеальному реакторі; 2 – перемішування з урахуванням флотації; 3 – глибина перемішування 0,6 Н; 4 – глибина перемішування 0,4 Н; 5 – глибина перемішування 0,35 Н; 6 – радіус перемішування 0,5 R; 7 – радіус перемішування 0,4 R; 8 – радіус перемішування 0,3 R

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° вихід біогазу збільшується на 18%.

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

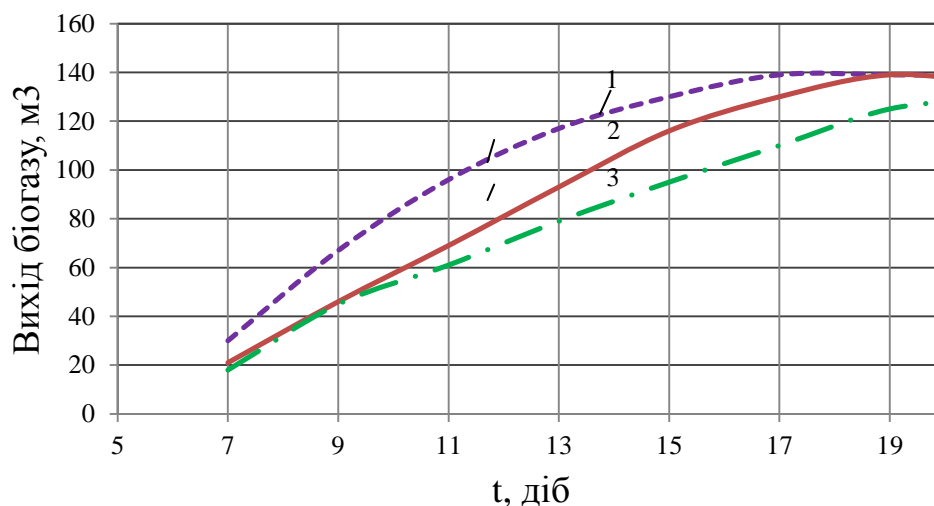


Рис. 3. Залежність виходу біогазу від часу збродження і температури:  
1 – 50°C; 2 – 45°C; 3 – 60°C

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 збродження великої кількості відходів доходить до 16 діб.

До переваг термофільного процесу збродження 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 збродженні відходів, які складаються переважно з вуглеводів.

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.

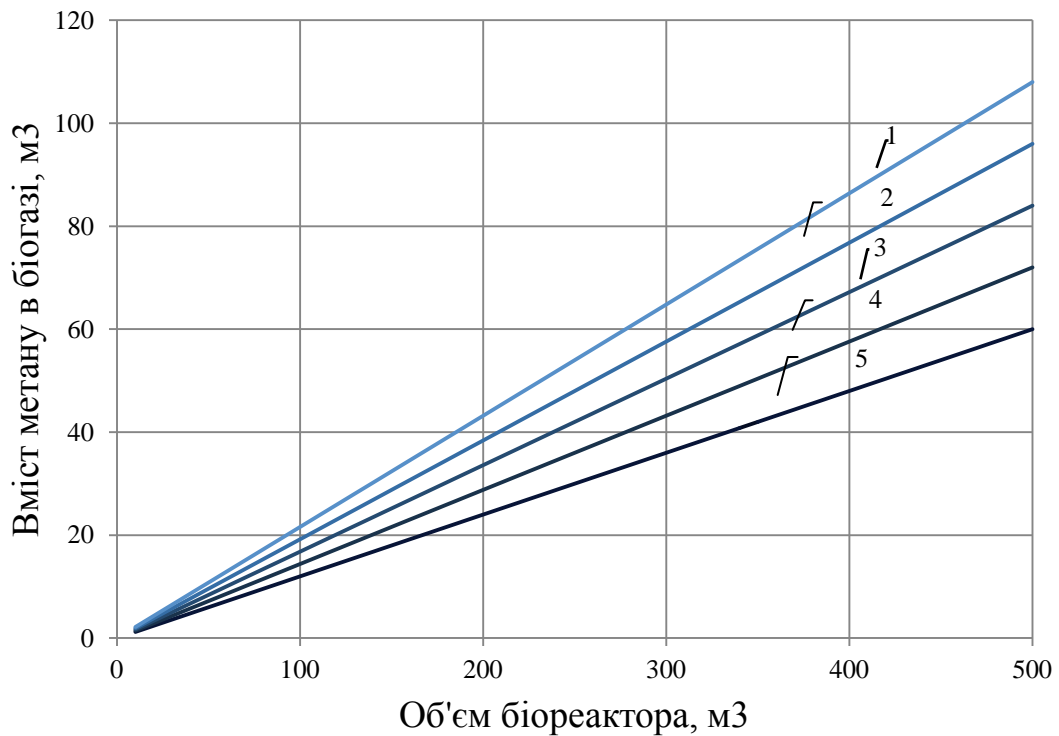


Рис.4. Залежність об'єму метану в біогазі від об'єму біореактора, та вмісту органічної речовини:  
 1 – 0,9; 2 – 0,8; 3 – 0,7; 4 – 0,6; 5 – 0,5

Одним з важливих показників, які впливають на процес бродіння 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 рівному співвідношенні вуглецю і азоту від 1 до 20. Оптимальне значення рН коливається залежно від сировини в межах від 6,5 до 8,5.

Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні біогазових установок з використанням анаеробного бродіння.

### Висновки

Досліджено вплив різних факторів на процес газогенерації при зброджуванні органічної частини ТПВ в реакторі біогазової установки. Встановлено, що максимальний вихід біогазу досягається при періодичності перемішування біомаси в біореакторі до 3-4 разів на добу. Подальше збільшення періодичності з 5 до 10 разів призводить до зменшення його виходу за рахунок зменшення активності бактерій, що продукують газ.

Вихід біогазу збільшується при збільшенні глибини  $H_p$  та радіусу  $R_p$  перемішування сировини, досягаючи максимального значення при

$R_n=(0.4\div 0.5)R$  і  $H_n=0.6H$ .

Максимальне значення об'єму біогазу забезпечується при збільшенні 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. При термофільному температурному режимі (40-60°C) час збродження відходів дорівнює 16 добам.

Основним компонентом біогазу, який використовується як енергетичне паливо, є метан. Зростанню вмісту метану в складу біогазу сприяє збільшення органічної складової у відходах; максимальне його значення досягається при зброджуванні відходів, що складаються переважно з вуглеводів.

### Список використаних джерел

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]: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.17.08 – “процессы и аппараты химических технологий”/ С.Д. Юрьевич. – Иваново, 2013. – 16с.
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.

*Стаття надійшла до редакції 08.12.2016 р.*