

Роговський І.Л.<sup>1</sup>  
Кісь-Коркіщенко Л.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет  
біоресурсів і  
природокористування  
України, м. Київ, Україна  
<sup>2</sup>Державний біотехнологічний  
університет,  
м. Харків, Україна  
**E-mail:**  
rogovskii@nubip.edu.ua

## ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕТАНТЕНКА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

<https://doi.10.5281/zenodo.15427993>

УДК 629.4

*Роговський І.Л., Кісь-Коркіщенко Л.В. Особливості функціонування метантенка біогазової установки.*

**Анотація.** Розкрито особливості методичного обґрунтування особливостей функціонування метантенка біогазової установки. Ідея наукової роботи полягає у використанні відходів і побічних продуктів переробних виробництв, які будуть впроваджені в сільській місцевості, в якості ко-субстратів при метановому зброджуванні побічної продукції тваринництва, що збільшить вихід біогазу та підвищить ефективність біогазових виробництв та вирішить проблему утилізації цих відходів. В результаті аналізу існуючих математичних моделей процесу отримання біогазу встановлено, що в умовах ідеального перемішування субстрату і постійної температури, головними факторами, що впливають на протікання метаногенезу, є час процесу, а також концентрація метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу). Математична модель процесу отримання біогазу в загальному випадку містить систему диференціальних рівнянь, спільне вирішення яких дозволяє при заданих початкових умовах знайти зміну в часі концентрації метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу).

**Ключові слова:** установка, модель, біогаз.

*Rogovskii I.L., Kis-Korkishchenko L.V. Features of the functioning of the biogas plant methane tank.*

**Abstract.** The article reveals the features of the methodological justification of the features of the functioning of the biogas plant methane tank. The idea of the scientific work is to use waste and by-products of processing industries, which will be implemented in rural areas, as co-substrates in methane fermentation of livestock by-products, which will increase the biogas yield and increase the efficiency of biogas production and solve the problem of disposal of these wastes. As a result of the analysis of existing mathematical models of the biogas production process, it was established that under conditions of ideal substrate mixing and constant temperature, the main factors affecting the course of methanogenesis are the process time, as well as the concentration of methanogens, substrate nutrients and metabolic products (biogas). The mathematical model of the biogas production process generally contains a system of differential equations, the joint solution of which allows, under given initial conditions, to find the change in time of the concentration of methanogens, substrate

*nutrients and metabolic products (biogas).*

**Key words:** *installation, model, biogas.*

### **Постановка проблеми**

Найбільш поширеним методом утилізації побічної продукції тваринництва (гною) є використання її для покращення родючості ґрунтів [1]. Однак, патогенні організми і яйця гельмінтів [2], які перебувають у гнойовій біомасі, можуть тривалий час зберігатися в зовнішньому середовищі, що може бути причиною епідемій та епізоотій [3]. Забезпечення ветеринарно-санітарного благополуччя у цьому випадку можна досягти внаслідок знезараження відходів тваринництва термічною стерилізацією за високої температури, що є енергомісним заходом [4]. Разом із тим, метанове зброджування гною, особливо в термофільному режимі, дозволяє його ефективно знезаражувати [5]. При цьому утворюється біогаз, який може бути використаний як для підтримання температурного режиму метантенка, так і для отримання електроенергії за наступним її продажем [6]. Переброджений знезаражений гній доцільно використовувати для підвищення родючості ґрунтів і відновлення у них гумусу [7]. Разом із тим, вихід біогазу при метановому зброджуванні деяких побічних продуктів тваринництва (наприклад, гною великої рогатої худоби), відносно невеликий, що не дозволяє забезпечити високу рентабельність виробництва [8]. Разом із тим, у сільській місцевості можна розвивати переробні виробництва аграрної продукції (молокопереробку, виробництво крохмалю із картоплі, олії із олієвісних культур тощо). Це дозволить частково вирішити проблему бізробіття в сільській місцевості, покращить матеріальний стан сільських жителів [9]. Але при переробці переробних підприємств отримуються відходи і побічні продукти (мезга, клітковий сік картоплі, сироватка, фуз тощо), які важко піддаються утилізації. Разом із тим, ці відходи і побічні продукти є чудовим косубстратом для гною великої рогатої худоби при його метановому зброджуванні в біогазовій установці, вихід біогазу [10]. А переброджений субстрат біогазової установки буде вноситись на поля для відновлення родючості ґрунту. Це вирішить проблему утилізації відходів і побічних продуктів переробних підприємств у сільській місцевості [11].

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Ідея наукової роботи полягає у використанні відходів і побічних продуктів переробних виробництв, які будуть впроваджені в сільській місцевості, в якості косубстратів при метановому зброджуванні побічної продукції тваринництва, що збільшить вихід біогазу та підвищить ефективність біогазових виробництв та вирішить проблему утилізації цих відходів [12].

Впровадження в агропромислових підприємствах та в сільській місцевості біогазових технологій дозволить отримати енергетично цінний біогаз, який можна конвертувати в електричну і теплову енергію. Вироблену електроенергію можна подавати для живлення обладнання агропромислових підприємств, а також в житло сільського населення [13]. Теплова енергія буде використовуватись для підтримання теплового режиму метантенка, і частково для гарячого водоспоживання. Сировиною для виробництва біогазу в агропромислових підприємствах і в сільській місцевості буде побічна продукція тваринництва, а також відходи і побічні продукти переробних підприємств, які функціонуватимуть на території сіл і селищ і перероблятимуть продукцію рослинництва і тваринництва. Використання косубстратів (відходів і побічних продуктів переробних виробництв) дозволить збільшити вихід біогазу в

кілька разів, що знизить термін окупності біогазової установки [14]. Щоб знизити транспортні витрати від перевезення косубстратів на значні відстані, буде обґрунтовано доцільність улаштування переробних виробництв безпосередньо на території сільськогосподарських підприємств, внаслідок чого підвищиться ефективність біогазових установок, а також буде частково вирішено нагальну проблему зайнятості населення у сільській місцевості. Відходи біогазового виробництва (дигестат, фільтрат) запропоновано використовувати для відновлення родючості ґрунтів та підживлення посівів, а після впровадження відповідних стандартів – для продажу населенню як високоякісного органічного добрива [15].

### Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є методичне обґрунтування особливостей функціонування метантенка біогазової установки.

### Методичний підхід в проведенні досліджень

Метантенк біогазової установки функціонує наступним чином. Метаноутворюючі бактерії, які містяться в субстраті, споживають його поживні речовини, виділяючи при цьому продукти метаболізму – біогаз (рис. 1: 1 – поживні речовини субстрату, що завантажуються в метантенк; 2 – поживні речовини субстрату, які вивантажуються із метантенка; 3 – поживні речовини субстрату, які переробляються метаноутворюючими бактеріями; 4 – поживні речовини субстрату, які переробляються метаноутворюючими бактеріями в мікробну біомасу; 5 – поживні речовини субстрату, які переробляються метаноутворюючими бактеріями в біогаз; 6 – розмноження метаноутворюючих бактерій; 7 – відмирання метаноутворюючих бактерій; 8 – вихід біогазу).

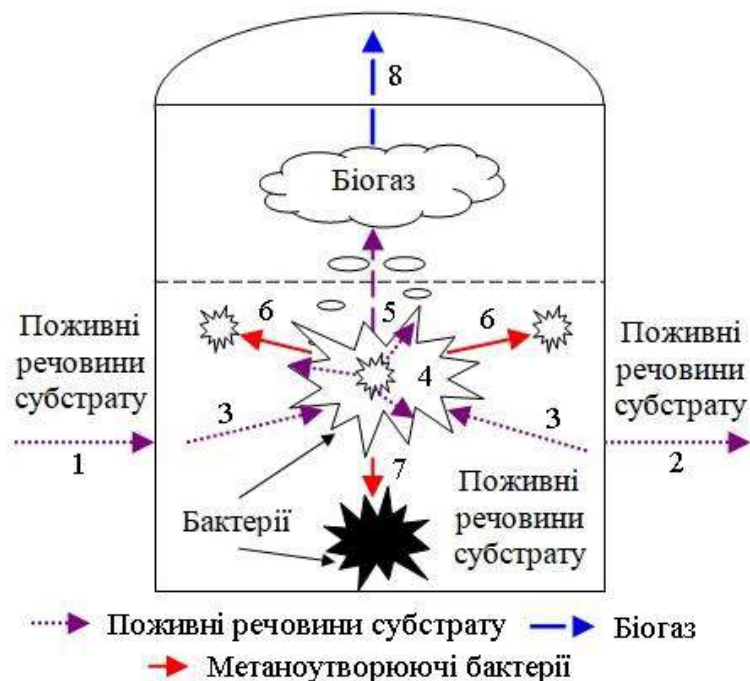


Рис. 1. Схема функціонування метантенка біогазової установки.

Поживні речовини субстрату в метантенку можна розділити на три складові (рис. 1): поживні речовини субстрату 1, що завантажуються в метантенк, поживні

речовини субстрату 2, які вивантажуються із метантенка, і поживні речовини субстрату 3, які переробляються наступним чином. метаноутворюючими бактеріями і перетворюються в мікробну біомасу 4 і продукти метаболізму (біогаз) 5. наступним чином. Метаноутворюючі бактерії при достатній кількості поживні речовини субстрату активно розмножуються 6, при їх відсутності – гинуть 7. Біогаз 8 виробляється метаноутворюючими бактеріями при споживанні поживних речовин субстрату.

### Результати досліджень

В умовах ідеального перемішування субстрату і постійної температури, головними факторами, що впливають на протікання метаногенезу, є час процесу, а також концентрація метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу). Математична модель процесу отримання біогазу в загальному випадку містить систему диференціальних рівнянь, спільне вирішення яких дозволяє при заданих початкових умовах знайти зміну в часі всіх основних параметрів біотехнологічного процесу:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = C(t) \\ \frac{dS}{dt} = S(t) \\ \frac{dV_{\bar{o}}}{dt} = V_{\bar{o}}(t) \end{cases} \quad (1)$$

де:  $C$  – концентрація біомаси метаноутворюючих бактерій,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $S$  – концентрація поживних речовин субстрату що, засвоюються бактеріями,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $V_{\bar{o}}$  – об'єм отриманого біогазу,  $\text{м}^3$ ;  $t$  – час метанового бродіння, діб;  $dC/dt$  – зміна концентрації в метантенку біомаси метаноутворюючих бактерій в часі,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ ;  $dS/dt$  – зміна концентрації в метантенку поживних елементів субстрату в часі,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ ;  $dV/dt$  – динаміка виходу біогазу в часі,  $\text{м}^3/\text{кг} \cdot \text{добу}$  ( $\text{м}^3$  біогазу з  $\text{кг}$  субстрату за добу).

Поживні елементи субстрату в метантенку можна розділити на три складові: поживні елементи, які завантажуються в метантенк, поживні елементи, які вивантажуються із метантенка, і поживні елементи, які переробляються метаноутворюючими бактеріями і перетворюються в мікробну біомасу і продукти метаболізму (біогаз):

$$\frac{dS}{dt} = \left( \frac{dS}{dt} \right)_{inp} - \left( \frac{dS}{dt} \right)_{out} - \left( \frac{dS}{dt} \right)_{conv}, \quad (2)$$

де  $dS/dt$  – зміна концентрації в метантенку поживних елементів субстрату в часі,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ ;  $(dS/dt)_{inp}$  – зміна концентрації поживних елементів в часі, завантажених із субстратом в метантенк,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ ;  $(dS/dt)_{out}$  – зміна концентрації поживних елементів в часі, вивантажених із субстратом із метантенка,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ ;  $(dS/dt)_{conv}$  – зміна концентрації поживних елементів субстрату, перероблених метаноутворюючими бактеріями,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ .

Зміна концентрації поживних елементів в часі, завантажених із субстратом в метантенк  $(dS/dt)_{inp}$ , визначається за формулою:

$$\left( \frac{dS}{dt} \right)_{inp} = p \cdot S_0, \quad (3)$$

де  $p$  – коефіцієнт розбавлення культури потоком свіжого субстрату (відносна швидкість

надходження субстрату),  $\text{дб}^{-1}$ ;  $S_0$  – початкова концентрація поживних речовин в субстраті,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Зміна концентрації поживних елементів в часі, вивантажених із субстратом із метантенка  $(dS/dt)_{out}$ , визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{out} = p \cdot S, \quad (4)$$

де  $S$  – концентрація поживних речовин в субстраті,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Концентрація поживних елементів субстрату, перероблених метаноутворюючими бактеріями  $(dS/dt)_{conv}$ , зменшується на кількість поживних елементів субстрату, що витрачається на формування клітинної маси бактерій, на енергію для життєдіяльності бактерій і на виробництво продуктів метаболізму і визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{conv} = \left(\frac{dS}{dt}\right)_{KB} + \left(\frac{dS}{dt}\right)_E + \left(\frac{dS}{dt}\right)_V, \quad (5)$$

де  $(dS/dt)_{KB}$  – зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на формування їх клітинної біомаси,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ ;  $(dS/dt)_E$  – зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на виробництво енергії для підтримання їх життєдіяльності,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ ;  $(dS/dt)_V$  – зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на виробництво біогазу,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ .

Зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на формування їх клітинної біомаси  $(dS/dt)_{KB}$ , визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{KB} = k_\alpha \cdot \mu_m \cdot C, \quad (6)$$

де  $k_\alpha$  – безрозмірний коефіцієнт засвоєння субстрату;  $\mu_m$  – максимальна питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій,  $\text{доба}^{-1}$ ;  $C$  – концентрація біомаси метаноутворюючих бактерій,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на виробництво енергії для підтримання їх життєдіяльності,  $(dS/dt)_E$ , визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_E = \frac{k_\beta \cdot \mu_m \cdot S}{k_a + S} \cdot C, \quad (7)$$

де  $k_\beta$  – безрозмірний коефіцієнт засвоєння субстрату;  $\mu_m$  – максимальна питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій,  $\text{доба}^{-1}$ ;  $S$  – концентрація поживних речовин в субстраті,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C$  – концентрація біомаси метаноутворюючих бактерій,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на виробництво біогазу  $(dS/dt)_V$ , визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_V = k \cdot \rho_b \cdot \frac{dV_b}{dt}, \quad (8)$$

де  $k$  – коефіцієнт перетворення поживних речовин субстрату в біогаз,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $\rho_b$  – щільність біогазу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $dV_b/dt$  – динаміка виходу біогазу в часі,  $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{добу}$ .

Модель зміни концентрації в метантенку поживних елементів субстрату в часі  $dS/dt$ , отримуємо шляхом підстановки в формулу (2) виразів (3), (4), (5), (6), (7) і (8):

$$\frac{dS}{dt} = p \cdot (S_0 - S) - \left( k_\alpha \cdot \mu_m \cdot C + \frac{k_\beta \cdot \mu_m \cdot S}{k_a + S} \cdot C + k \cdot \rho_\delta \cdot \frac{dV_\delta}{dt} \right). \quad (9)$$

Початкова концентрація поживних речовин в субстраті  $S_0$  залежить від вологості  $W$ , зольності  $A$  та об'ємної щільності субстрату  $\rho_{\text{суб}}$  у наступному співвідношенні:

$$S_0 = \frac{\rho_{\text{суб}} \cdot (100 - W)}{100 - A}, \quad (10)$$

де  $\rho_{\text{суб}}$  – об'ємна щільність субстрату,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $W$  – вологість субстрату, %;  $A$  – зольність субстрату, %.

Завантаження метантенка в 1  $\text{кг СОР}/\text{м}^3$  за день проблем із роботою, як правило, не становить. На практиці часто зустрічається завантаження ферментатора в 2-3  $\text{кг СОР}/\text{м}^3$  за день. При цьому необхідно спостерігати, чи не розпочалося зменшення виходу газу внаслідок затримки розвитку бактерій. Якщо завантаження метантенка становить 4-5  $\text{кг СОР}/\text{м}^3$  за день, то продуктивність бактерій може зменшуватись, що призводить до зниження виробництва біогазу. При цьому система буде перевантаженою. Існує інформація, що завантаження горизонтального ферментатора, що працює в проточному режимі, може досягати до 10  $\text{кг СОР}/\text{м}^3$  за день. Однак такі показники завантаження можливі лише при наявності другого метантенка, в якому б відбувалось доброджування субстрату.

Найбільш поширені моделі, що описують кінетику залежно від концентрації лише одного субстрату, який називають лімітуючим; вважається, що інші субстрати при цьому знаходяться в надлишку і не впливають на швидкість росту. Найпростіша кінетична математична модель концентрації біомаси мікроорганізмів описується простою моделлю Мальтуса або моделлю експоненціального росту:

$$\frac{dC}{dt} = \mu \cdot C, \quad (11)$$

де  $C$  – концентрація бактерій,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu$  – питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій,  $\text{доба}^{-1}$  (цей параметр аналогічний складним процентам; наприклад, питома швидкість росту 0,1  $\text{доба}^{-1}$  еквівалентна швидкості росту 10% за добу).

Питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій  $\mu$  залежить від концентрації поживних елементів субстрату і може визначатись за формулами, наведеними в табл. 1-4.

Таблиця 1

Моделі питомої швидкості росту мікроорганізмів

Модель	Формула
Кобозєва	$\mu = KS$ Питома швидкість росту мікроорганізмів $\mu$ знаходиться в лінійній залежності від концентрації поживних речовин в субстраті $S$
Блекмана	$\mu = \begin{cases} K \cdot S & \text{при } S < S^* \\ K \cdot S^* & \text{при } S \geq S^* \end{cases}$ При малих концентраціях дає ті ж результати, що і модель Кобозєва, однак при досягненні величиною $S$ деякого критичного рівня $S^*$ швидкість росту припиняє зростати
Моно (Monod)	$\mu = \mu_n \cdot \frac{S}{K_s + S}$ Точність моделі Моно для чистих культур і простих субстратів

	дуже висока. Модель підходить для однорідних культур, але не для гетерогенних культур або складних субстратів
Мозера (Moser)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S^n}{K_s + S^n} \text{ де } n = \frac{\log \frac{\mu_0 \cdot K_{s0}}{\mu_{m0} - \mu_0}}{\log S_0}$
Контуа (Contois)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_c \cdot C + S} = \mu_m \cdot \frac{1}{\frac{K_c \cdot C}{S} + 1}$
Пауелла (Powell)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{(K_p + L + S)}{2 \cdot L} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot L \cdot S}{(K_p + L + S)^2}} \right]$
Чена і Хашімото (Chen & Hashimoto)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{\frac{S}{S_0}}{K + \frac{(1 - K) \cdot S}{S_0}}$
Бергтера (Bergter)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{t_0}{t_{\text{від}}}} \right]$ Це модифікована модель Моно, яка розглядає уповільнення внаслідок затримки при виникненні лаг-фази з часу $t_0$ до часу затримки $t_{\text{затр}}$ .

де  $\mu_m$  – максимальна питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій, доба<sup>-1</sup>;  $S$  – концентрація поживних речовин в субстраті, кг/м<sup>3</sup>;  $S^*$  – критична концентрація поживних речовин в субстраті, при якій швидкість росту мікроорганізмів припиняє зростати, кг/м<sup>3</sup>;  $K$  – безрозмірний параметр, що описує кінетику росту мікроорганізмів за рахунок активності ферменту;  $K_S$  – константа насичення, чисельно рівна такій концентрації речовини, при якій швидкість росту сягає половини граничної, кг/м<sup>3</sup>;  $K_M$  – безрозмірний параметр Мозера ( $K_M$  завжди більший одиниці);  $K_c$  – безрозмірний параметр Контуа;  $K_p$  – параметр, який описує кінетику росту за рахунок активності ферменту, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – параметр, який описує кінетику росту за рахунок дифузії і проникності, кг/м<sup>3</sup>;  $S_0$  – початкова концентрація поживних речовин в субстраті, кг/м<sup>3</sup>;  $t_0$  – час початку метанового бродіння, дів;  $t_{\text{затр}}$  – час закінчення лаг-фази, дів

Таблиця 2

Моделі питомої швидкості росту мікроорганізмів з врахуванням інгібування підвищеними концентраціями субстрату

Модель	Формула
Аїба та ін. (Aiba et al)	$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \cdot e^{\frac{S}{K_i}}$
Уебба (Webb)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S \cdot \left(1 + \frac{\beta \cdot S}{K_i}\right)}{S + K_s + \frac{S^2}{K_i}}$
Халдейна (Haldane)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{(S + K_s) \cdot \left(1 + \frac{S}{K_i}\right)} = \mu_m \cdot \frac{S}{S + K_s} \cdot \frac{K_i}{S + K_i}$
Яно та ін. (Yano et al.)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{S}{K_i}\right)^i\right]}$
Гранта (Grant)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{1}{S + K_i}$
Андріса (Andrews)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_i}}$
Хілла і Бартона (Hill & Barth)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_{i1}} + \frac{S \cdot I}{K_{i2}}}$
Хана і Левенспіля (Han & Levenspiel)	$\mu = \mu_m \cdot \left(1 - \frac{S}{S^*}\right) \cdot \frac{S}{S + K_s \left(1 - \frac{S}{S^*}\right)^m}$

Таблиця 3

Моделі питомої швидкості росту мікроорганізмів з врахуванням інгібування продуктом метаболізму

Модель	Формула
Хіншельвуда (Hinshelwood)	$\mu = \mu_m - K \cdot V$
Мітсдорфера (Mitsdörffer)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S_n}{S^n \cdot (1 + K_b \cdot V \cdot S^n)}$

Єрусалимського	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{K_v}{V + K_v}$
Бергера	$\mu = \mu_m \cdot \frac{1}{1 + \frac{V^k}{K_v}}$
Холсберга та ін. (Holzberg et al.)	$\mu = \mu_m - K_1 \cdot (V - K_2)$
Аїба та ін. (Aiba et al)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot e^{-k \cdot V}$
Базау і Вілке (Bazua & Wilke)	$\mu = \frac{S}{K_s + S} \cdot \left( \mu_{m, V=0} - \frac{a \cdot \bar{V}}{b - V} \right)$
Госа і Тіагі (Ghose & Tyagi)	$\mu = \mu_m \cdot \left( 1 - \frac{V}{V^*} \right) \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_s}}$
Мозера (Mosser), і Бергтера (Bergter)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S^n}{K_s + S^n} \cdot \frac{K_v}{K_v + V^m}$
Даглі і Хіншельвуда (Dagley & Hinshelwood)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot (1 - K \cdot V)$
Хана і Левенспіля (Han & Levenspiel)	$\mu = \mu_m \cdot \left( 1 - \frac{V}{V^*} \right) \frac{S}{S + K_s \cdot \left( 1 - \frac{V}{V^*} \right)^m}$

Таблиця 4

Моделі питомої швидкості росту мікроорганізмів для багатокомпонентних субстратів

Модель	Модель	Формула
Мультиплікативна	Функція є добутком однофакторних залежностей	$\mu = f(S_1)f(S_2)$
Адитивна	Функція є сумою однофакторних залежностей	$\mu = \frac{S_1}{K_1 + S_1} + \frac{S_2}{K_2 + S_2}$
Альтернативна	Багатофакторна залежність підпорядковується принципу кінетичного мінімуму. Для кожного субстрату існує залежність, коли лімітуючим фактором є лише цей субстрат. Реально ж мікроорганізми ростуть зі швидкістю, яка є найменшою з усіх можливих.	$\mu = \min_{i=1}^k [\mu(S_i)]$

## Висновки

1. В результаті аналізу існуючих математичних моделей процесу отримання біогазу встановлено, що в умовах ідеального перемішування субстрату і постійної температури, головними факторами, що впливають на протікання метаногенезу, є час процесу, а також концентрація метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу). Математична модель процесу отримання біогазу в загальному випадку містить систему диференціальних рівнянь, спільне вирішення яких дозволяє при заданих початкових умовах знайти зміну в часі концентрації метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу).

## Список використаних джерел

1. Huang W.B., Wachemo A.C., Yuan H.R., Li X.J. Full utilization of nutrients in rice straw by integrating mushroom cultivation, biogas production, and fertilizer use. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019. Vol. 12, Iss. 4. P. 174-183. doi: 10.25165/j.ijabe.20191204.4658.
2. Huang W.B., Yuan H.R., Li X.J. Multi-perspective analyses of rice straw modification by *Pleurotus ostreatus* and effects on biomethane production. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 296. Article number: 122365. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122365.
3. Hublin A., Zokic T.I., Zelic B. Optimization of Biogas Production from Co-digestion of Whey and Cow Manure. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2012. Vol. 17. Iss. 6. P. 1284-1293. doi: 10.1007/s12257-012-0044-z.
4. Ibn Abubakar B.S.U., Ismail N. Anaerobic Digestion of Cow Dung for Biogas Production. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7. Iss. 2. P. 169-172.
5. Induchoodan Tg, Izharul Haq, Ajay S. Kalamdhad. Factors affecting anaerobic digestion for biogas production: a review. *Advanced Organic Waste Management*. 2022. P. 223-233. DOI: 10.1016/B978-0-323-85792-5.00020-4.
6. Ismailov B.R., Babakhodjaev R.P., Ismailov K.B. Optimization of Parameters of Anaerobic Fermentation of Biomass on the Mathematical Model of Kobozev. *Technical science and innovation*. 2020. Vol. 1. Iss. 03. P. 70–76.
7. Jaffar M., Pang Y.Z., Yuan H.R., Zou D.X., Liu Y.P., Zhu B.N., Korai R.M., Li X.J. Wheat straw pretreatment with KOH for enhancing biomethane production and fertilizer value in anaerobic digestion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 24, Iss. 3. P. 404-409. doi: 10.1016/j.cjche.2015.11.005.
8. Jaffar M. Yuan H.R., Zou D.X., Liu Y.P., Korai R.M., Pang Y.Z., Li X.J. Wheat straw pretreatment with potassium hydroxide for enhanced biogasification and fertilizer value. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2015. Vol. 24, Iss. 10B. P. 3491-3498.
9. Janke L., Weinrich S., Leite A.F., Terzariol F.K., Nikolausz M., Nelles M., Stinner W. Improving anaerobic digestion of sugarcane straw for methane production: Combined benefits of mechanical and sodium hydroxide pretreatment for process designing. *Energy Conversion And Management*. 2017. Vol. 141, SI. P. 378-389. doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.083.
10. Jha A.K., Li J., Zhang L., Ban Q., Jin Y. Comparison between Wet and Dry Anaerobic Digestions of Cow Dung under Mesophilic and Thermophilic Conditions. *Advances in Water Resource and Protection*. 2013. Vol. 1. Iss. 2. P. 28-38.
11. Kasprzak A., Krzystek L., Ledakowicz S. Co-digestion of agricultural and industrial wastes. *Chemical Papers*. 2010. Vol. 64. Iss. 2. P. 127-131. doi: 10.2478/s11696-009-0108-5.

12. Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V., Goel R. Fungal pretreatment and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 2019. Vol. 286. Article number: 121368. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121368.

13. Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V. Optimization of process parameters for accelerated methane yield from anaerobic co-digestion of rice straw and food waste. *Renewable energy*. 2020. Vol. 149. P. 1352-1359. doi: 10.1016/j.renene.2019.10.124.

14. Romaniuk W., Polishchuk V., Marczuk A., Titova L., Rogovskii I., Borek K. Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. *Agricultural Engineering (wir.ptir.org)*. Krakow. Poland. 2018. Vol. 22. №1. P. 105—125. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0010>.

15. Rogovskii I.L., Polishchuk V.M., Titova L.L., Sivak I.M., Vyhovskyi A.Y. Study of biogas during fermentation of cattle manure using a stimulating additive in form of vegetable oil sediment. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15(22). P. 2652-2663.

## References

1. Huang W.B., Wachemo A.C., Yuan H.R., Li X.J. (2019). Full utilization of nutrients in rice straw by integrating mushroom cultivation, biogas production, and fertilizer use. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. Vol. 12, Iss. 4. P. 174-183. doi: 10.25165/j.ijabe.20191204.4658.

2. Huang W.B., Yuan H.R., Li X.J. (2020). Multi-perspective analyses of rice straw modification by *Pleurotus ostreatus* and effects on biomethane production. *Bioresource Technology*. Vol. 296. Article number: 122365. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122365.

3. Hublin A., Zokic T.I., Zelic B. (2012). Optimization of Biogas Production from Co-digestion of Whey and Cow Manure. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. Vol. 17. Iss. 6. P. 1284-1293. doi: 10.1007/s12257-012-0044-z.

4. Ibn Abubakar B.S.U., Ismail N. (2012). Anaerobic digestion of cow dung for biogas production. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 7. Iss. 2. P. 169-172.

5. Induchoodan Tg, Izharul Haq, Ajay S. (2022). Kalamdhad. Factors affecting anaerobic digestion for biogas production: a review. *Advanced Organic Waste Management*. P. 223-233. DOI: 10.1016/B978-0-323-85792-5.00020-4.

6. Ismailov B.R., Babakhodjaev R.P., Ismailov K.B. (2020). Optimization of Parameters of Anaerobic Fermentation of Biomass on the Mathematical Model of Kobozev. *Technical science and innovation*. Vol. 1. Iss. 03. P. 70–76.

7. Jaffar M., Pang Y.Z., Yuan H.R., Zou D.X., Liu Y.P., Zhu B.N., Korai R.M., Li X.J. (2016). Wheat straw pretreatment with KOH for enhancing biomethane production and fertilizer value in anaerobic digestion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. Vol. 24, Iss. 3. P. 404-409. doi: 10.1016/j.cjche.2015.11.005.

8. Jaffar M. Yuan H.R., Zou D.X., Liu Y.P., Korai R.M., Pang Y.Z., Li X.J. (2015). Wheat straw pretreatment with potassium hydroxide for enhanced biogasification and fertilizer value. *Fresenius Environmental Bulletin*. Vol. 24, Iss. 10B. P. 3491-3498.

9. Janke L., Weinrich S., Leite A.F., Terzariol F.K., Nikolausz M., Nelles M., Stinner W. (2017). Improving anaerobic digestion of sugarcane straw for methane production: Combined benefits of mechanical and sodium hydroxide pretreatment for process designing. *Energy Conversion And Management*. Vol. 141, SI. P. 378-389. doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.083.

10. Jha A.K., Li J., Zhang L., Ban Q., Jin Y. (2013). Comparison between Wet and Dry Anaerobic Digestions of Cow Dung under Mesophilic and Thermophilic Conditions.

Advances in Water Resource and Protection. Vol. 1. Iss. 2. P. 28-38.

11. Kacprzak A., Krzystek L., Ledakowicz S. (2010). Co-digestion of agricultural and industrial wastes. *Chemical Papers*. Vol. 64. Iss. 2. P. 127-131. doi: 10.2478/s11696-009-0108-5.

12. Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V., Goel R. (2019). Fungal pretreatment and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. Vol. 286. Article number: 121368. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121368.

13. Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V. (2020). Optimization of process parameters for accelerated methane yield from anaerobic co-digestion of rice straw and food waste. *Renewable energy*. Vol. 149. P. 1352-1359. doi: 10.1016/j.renene.2019.10.124.

14. Romaniuk W., Polishchuk V., Marczuk A., Titova L., Rogovskii I., Borek K. (2018). Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. *Agricultural Engineering (wir.ptir.org)*. Krakow. Poland. Vol. 22. №1. P. 105—125. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0010>.

15. Rogovskii I.L., Polishchuk V.M., Titova L.L., Sivak I.M., Vyhovskyi A.Y. (2020). Study of biogas during fermentation of cattle manure using a stimulating additive in form of vegetable oil sediment. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 15(22). P. 2652-2663.