

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА

УДК 631.4.001

[http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31\(45\)-19](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-19)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИХОДУ БІОГАЗУ ДОБОВОГО ОБ'ЄМУ ЗАВАНТАЖЕННЯ СУБСТРАТУ З ЙОГО ПОСТУПОВОЮ ПОДАЧЕЮ

Валієв Т.,

<https://orcid.org/0000-0003-3400-6147>, e-mail: timurvaliev@gmail.com

Поліщук В., д-р техн. наук, проф.,

<https://orcid.org/0000-0002-9654-9051>, e-mail: polishchuk@nubip.edu.ua

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація

Мета дослідження – експериментальне встановлення впливу на вихід біогазу добового об'єму завантаження субстрату з його поступовою подачею. Практичним результатом буде розробка моделі технічного контролю виходу біогазу добового об'єму завантаження субстрату з його поступовою подачею.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є узагальнення та аналіз відомих наукових результатів сучасної організації виробництва біогазу добового об'єму завантаження субстрату з його поступовою подачею. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки завдань дослідження використовувався аналітичний метод і порівняльний аналіз. Для розробки емпіричних моделей, використано основні положення теорії газу, системотехніки, блок-схем алгоритму розподілу виробничих операцій.

Результати дослідження. У статті проаналізовано табульовані дані ваги субстрату і його окремих компонентів зі щоденним завантаженням метантенка. Результати дослідження виходу біогазу з поступовим завантаженням субстрату засвідчили, що бродіння супроводжується двома піками максимального виходу біогазу. Автор графічно представив результативну залежність середнього виходу біогазу з поступовою подачею субстрату від частки зміненого субстрату. Обговорено питання розрахунку прогнозованих значень середнього виходу біогазу з бродінням гною ВРХ з додаванням 3 % гліцерину від маси гною. Представлено узагальнювальні порівняння за основними показниками біогазової установки з метантенку об'ємом 10 м³ залежно від добового виходу біогазу з одиниці маси субстрату.

Висновок. У результаті проведених досліджень одержано нові науково обґрунтовані технічні та технологічні рішення і математичні моделі, спрямовані на підвищення ефективності виробництва біогазу добового об'єму завантаження субстрату з його поступовою подачею. У результаті аналізу об'єкта дослідження обґрунтовано, що поступова подача субстрату в метантенк забезпечує більший за обсягом і рівномірніший у часі вихід біогазу порівняно з періодичною подачею. З одноразовою щоденною зміною субстрату до 20 % вихід біогазу зростає до 13,8 л/(кг/добу). За таких умов теплота згорання біогазу становить 25 МДж/м³. Зростання одноразової щоденної зміни субстрату до 30 % збільшує вихід біогазу до 19,8 МДж/м³, однак тоді, внаслідок підвищеному вмісту в ньому вуглекислого газу теплота згорання знижується до 12–13 МДж/м³. У випадку 50 % зміни субстрату метанове бродіння припиняється внаслідок вимивання маточної культури метанотвірних бактерій.

Ключові слова: біогаз, метантенк, косубстрат, поступове завантаження, сирий гліцерин, біогазовий реактор.

Вступ. У ході періодичного завантаження субстрату в метантенк виникає 1-2 піки максимального виходу біогазу [Romaniuk, 2022a], під час переходу з експоненціальної фази до фази уповільнення росту [Rogovskii, 2020a]. Максимальний вихід біогазу спостерігається протягом декількох днів [Palamarchuk, 2021], після чого інтенсивність його генерації поступово знижується аж до повного припинення [Mazzanti, 2021]. Час повного розкладання біомаси за анаеробного зброджування може становити 30-45 днів [D'Adamo, 2022], однак вихід біогазу в цьому випадку низький [Kuzmich, 2021] і не забезпечує прибутковість біогазової установки [Parsaee, 2019].

Для рівномірного розподілу в часі виходу біогазу застосовується поступова подача субстрату в метантенк [Rogovskii, 2020], коли субстрат подається протягом дня великою кількістю незначних порцій [Voinalovych, 2020] з одночасним видаленням відпрацьованого біошламу [Miroshnichenko, 2022]. За таких умов кожна нова порція субстрату, яка завантажується в метантенк, буде формувати свій максимальний вихід біогазу (рис. 1) [Hrynkiv, 2020]. Максимуми від кожної порції завантаженого субстрату формуватимуть загальний вихід біогазу з метантенка [Rogovskii, 2019], який істотно перевищуватиме вихід біогазу з періодичним завантаженням [Romaniuk, 2022b]. Підкреслимо, таке частіше будуть завантажуватися нові порції субстрату [Rashama, 2019], тим більш рівномірним буде спільний вихід біогазу [Nazarenko, 2020].

Постановка завдань. Мета досліджень — експериментально встановити вплив на вихід біогазу добового об'єму завантаження субстрату з його поступовою подачею. Практичний результат передбачає розробку моделі технічного контролю виходу біогазу добового об'єму завантаження субстрату з його поступовою подачею.

Методи і матеріали. Методологічною основою роботи є узагальнення і аналіз відомих

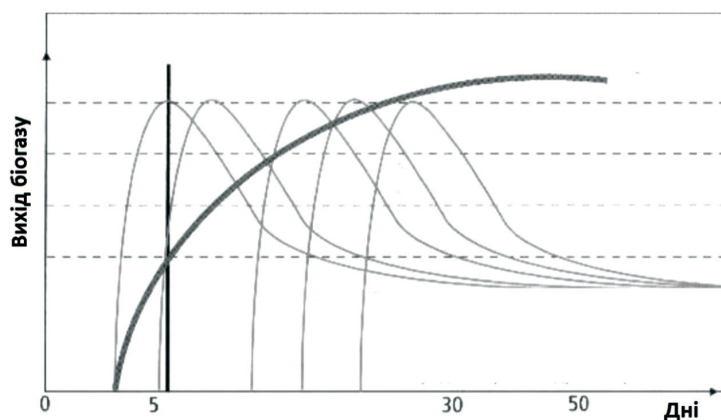


Рисунок 1 – Схематичне зображення формування виходу біогазу з безперервним завантаженням субстрату в метантенк

наукових результатів сучасної організації виробництва біогазу добового об'єму завантаження субстрату з його поступовою подачею та використання алгоритму розподілу вимог і теорії системотехніки. Для формування наукової проблеми, визначення мети й постановки завдань дослідження використано аналітичний метод і порівняльний аналіз. Для розробки емпіричних моделей використано основні положення теорії емпіричних досліджень, системи стаціонарних апаратів обслуговування, блок-схем алгоритму розподілу операцій.

Результати. Проведено дослідження процесу поступової подачі субстрату в метантенк лабораторної біогазової установки (рис. 2).



Рисунок 2 – Експериментальні біогазові установки

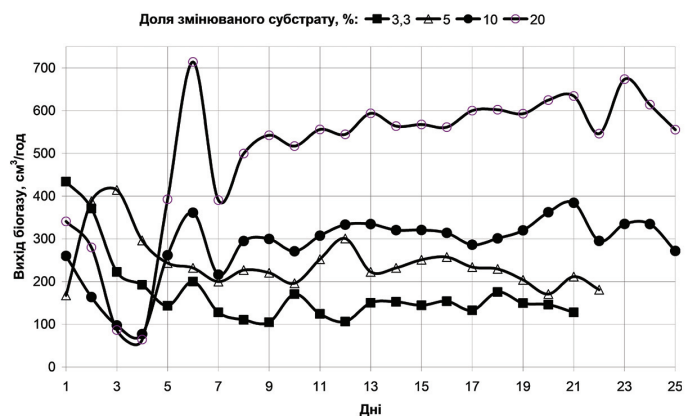
Таблиця 1 – Вага субстрату і окремих його компонентів за щоденного завантаження метантенка

| Показник | Процент оновлюваного субстрату | | | |
|--|--------------------------------|-----------|------------|-----------|
| | 1/30 (3,3%) | 1/20 (5%) | 1/10 (10%) | 1/5 (20%) |
| Початкове завантаження субстрату, кг | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 4,2 |
| Щоденне завантаження субстрату, кг, зокрема: | 0,1422 | 0,2132 | 0,4264 | 0,8527 |
| гній ВРХ, кг | 0,057 | 0,085 | 0,17 | 0,34 |
| вода, кг | 0,083 | 0,125 | 0,25 | 0,5 |
| сирий гліцерин, л | 0,0017 | 0,0025 | 0,005 | 0,01 |
| Щоденне вивантаження біошламу, кг | 0,1422 | 0,2132 | 0,4264 | 0,8527 |

У метантенк об'ємом 29 м³ завантажувалося 4,2 кг субстрату, який складався з 1,7 кг гною ВРХ, 2,5 кг води і 0,05 л неочищеного гліцерину (3 % від маси субстрату). Коефіцієнт заповнення метантенка становить 0,5, коефіцієнт спорожнення – 0,28. На 2-3 добу бродіння спостерігався максимальний вихід біогазу. У той час у метантенк щодоби додавалася нова порція субстрату в розмірі 1/30, 1/20, 1/10 і 1/5 частини завантаженої порції субстрату. Вагу субстрату й його окремих компонентів за щоденного завантаження наведено в таблиці 1.

Результати дослідження виходу біогазу на основі поступового завантаження субстрату наведено на рисунку 3, де бачимо, що бродіння супроводжується двома піками максимального виходу біогазу.

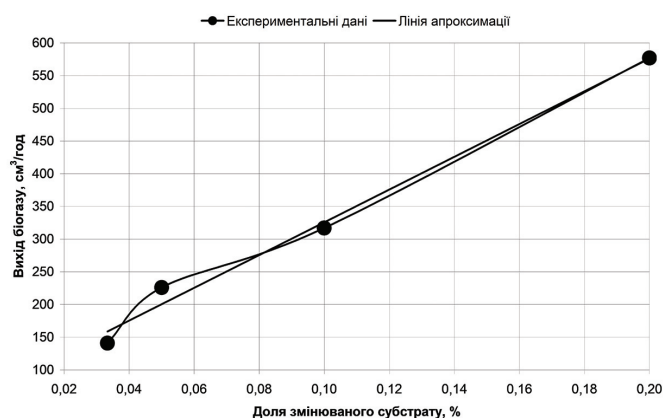
Початок відліку збігається з першим піком, після чого генерація біогазу згасає, а на шосту добу бродіння спостерігається другий пік генерації. На 8 добу бродіння вихід біогазу стабілізується, і в наступні дні спостерігається відносно рівномірна генерація біогазу з незначним збільшенням його виходу в часі. Середній вихід біогазу за щоденного оновлення – 3,3 % субстрату від завантаженого на початку бродіння становить – 141 см³/год, за оновлення 5 % субстрату – 226 см³/год, 10% – 317 см³/год, 20% – 577 см³/год. Відхилення виходу біогазу від середнього значення, як правило, становить 6–8 %. Зі збільшенням кількості завантажень субстрату протягом доби


Рисунок 3 – Генерація біогазу за поступового завантаження субстрату

відхилення виходу біогазу від середнього значення будуть зменшуватися.

На рисунку 4 показана залежність середнього виходу біогазу з поступовою подачею від відсотка оновлюваного субстрату, що апроксимується лінійною функцією:

$$Q = 2504 \cdot D + 75,29 \text{ при } R^2=0,9902, (1)$$


Рисунок 4 – Залежність середнього виходу біогазу з поступовою подачею субстрату від частки зміненого субстрату

де: Q – вихід біогазу, $\text{см}^3/\text{год}$; D – частка зміненого субстрату відносно до завантаженого, %.

Обговорення. Зазначимо, що при 50 % одноразової щоденної зміни субстрату бродіння припиняється внаслідок вимивання маточної культури метанотвірних бактерій [Romaniuk, 2018]. У випадку 30 % зміни субстрату вихід біогазу не зменшується [Nazarenko, 2020], однак теплота згоряння біогазу, розрахована за методом [Nazarenko, 2021] у результаті збільшення вмісту вуглекислого газу, становить 12-13 МДж/м³ (проти 25 МДж/м³ за СОУ 24.14-3-561:2007 [6]). Тому формула (1) дійсна за умови одноразової щоденної зміни субстрату в метантенку не більше, ніж 30 % [Huang, 2022]. Розрахункові прогнозовані значення середнього виходу біогазу під час бродіння гною ВРХ з додаванням 3 % гліцерину від маси гною [Rabii, 2019], встановлені за виразом (1), наведено в таблиці 2. Для порівняння: таблиця 3 містить основні показники біогазової установки з метантенку об'ємом 10 м³ залежно від добового

Таблиця 2 – Розрахункові прогнозовані значення середнього виходу біогазу під час бродіння гною ВРХ з додаванням 3 % гліцерину від маси гною

| Щоденна зміна субстрату, % | Вихід біогазу, $\text{см}^3/\text{год}$ | Вихід біогазу, л/(кг · добу) |
|----------------------------|---|------------------------------|
| 0 | 75,29 | 1,8 |
| 2 | 125,37 | 3,0 |
| 5 | 200,49 | 4,8 |
| 10 | 325,69 | 7,8 |
| 20 | 576,09 | 13,8 |
| 30 | 826,49 | 19,8 |

виходу біогазу з одиниці маси субстрату [Kiani, 2021].

Висновки. Поступова подача субстрату в метантенк забезпечує більший за обсягом і більш рівномірний у часі вихід біогазу порівняно з періодичною подачею. За одноразової щоденної зміни субстрату до 20 % вихід біогазу зростає до 13,8 л/(кг·добу). За цих умов теплота згорання біогазу становить 25 МДж/м³. Збільшення одноразової щоденної зміни субстрату до 30 % підвищує обсяг виходу біогазу до 19,8 МДж/м³, однак унаслідок більшого вмісту в ньому вуглекислого газу теплота

Таблиця 3 – Основні показники біогазової установки з метантенку об'ємом 10 м³ залежно від добового виходу біогазу з одиниці маси субстрату

| Показник | Одноразова щоденна зміна субстрату, % | | | | |
|--|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| Вихід біогазу, м ³ /добу | 22,1 | 35,3 | 57,4 | 101,5 | 145,6 |
| Об'єм біогазу, який використовується для корисних потреб, %: | | | | | |
| Січень | * | * | 33,3 | 62,3 | 46,5 |
| Лютий | * | * | 33,4 | 62,4 | 46,6 |
| Березень | * | * | 33,9 | 62,6 | 47,0 |
| Квітень | * | * | 34,7 | 63,1 | 47,6 |
| Травень | * | 7,1 | 42,8 | 67,7 | 54,2 |
| Червень | * | 18,4 | 49,8 | 71,6 | 59,7 |
| Липень | * | 22,4 | 52,3 | 73,0 | 61,7 |
| Серпень | * | 18,8 | 50,1 | 71,8 | 60,0 |
| Вересень | * | 1,0 | 39,1 | 65,6 | 51,2 |
| Жовтень | * | * | 34,6 | 63,1 | 47,6 |
| Листопад | * | * | 34,0 | 62,7 | 47,1 |
| Грудень | * | * | 33,6 | 62,5 | 46,8 |
| Коефіцієнт товарності | * | 0,053 | 0,393 | 0,657 | 0,513 |

* виробленого біогазу не вистачає для підтримання температурного режиму метантенка

згорання знижується до 12–13 МДж/м³. У випадку 50 % зміни субстрату метанове бродіння припиняється внаслідок вимивання маточної культури метанотвірних бактерій.

Перелік літератури

- D'Adamo I., Sassanelli C. (2022) Bio-methane community: a research agenda towards sustainability. *Sustainability*. 14. pp. 4735. <https://doi.org/10.3390/su14084735>.
- Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Ly-senko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. (2020) Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(105). pp. 19-29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206073>.
- Huang X., Wang S., Shi Z., Fang L., Yin C. (2022) Challenges and strategies for biogas production in the circular agricultural waste utilization model: a case study in rural China. *Energy*. 241. pp. 122889. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122889>.
- Kiani M., Parsaee M., Mahdavi-far Z. (2021) Biogas production from sugarcane vinasse at mesophilic and thermophilic temperatures by static granular bed reactor. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 48. pp. 101569. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101569>.
- Kuzmich I. M., Rogovskii I. L., Titova L. L., Nadtochiy O. V. (2021) Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 677. pp. 052002. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>.
- Mazzanti M., Modica M., Rampa A. (2021) The biogas dilemma: An analysis on the social approval of large new plants. *Waste Manag.* 133. pp. 10-12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.026>.
- Miroshnichenko I. V., Nikulina N. V. (2022) Designing a biogas plant for an educational and scientific livestock complex. *KnE Life Sci.* 8. pp. 151-163. <https://doi.org/10.18502/cls.v7i1.10117>.
- Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. (2020) Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6(7–108). pp. 71-79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>.
- Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskiy M., Rogovskii I., Mikhalova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021) Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4(7(112)). pp. 41-49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
- Palamarchuk I., Rogovskii I., Titova L., Omelyanov O. (2021) Experimental evaluation of energy parameters of volumetric vibroseparation of bulk feed from grain. *Engineering for Rural Development*. 20. pp. 1761-1767. <https://doi.org/10.22616/ER-Dev.2021.20.TF386>.
- Parsaee M., Kiani M., Kiani D., Karimi K. (2019) A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass Bioenergy*. 122. pp. 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>.
- Rabii A., Aldin S., Dahman Y., Elbeshbishy E. (2019) A review on anaerobic co-digestion with a focus on the microbial populations and the effect of multi-stage digester configuration. *Energies*. 12. pp. 1106. <https://doi.org/10.3390/en12061106>.
- Rashama C., Ijoma G., Matambo T. (2019) Biogas generation from by-products of edible oil processing: a review of opportunities, challenges and strategies. *Biomass Convers. Biorefinery*. 9. pp. 803-826. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00385-6>.
- Rogovskii I. L., Polishchuk V. M., Titova L. L., Sivak I. M., Vyhovskyi A. Yu., Drahnev S. V., Voinash S. A. (2020a) Study of biogas during fermentation of cattle manure using a stimulating additive in form of vegetable oil sediment. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 15(22). pp. 2652-2663.
- Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhan-nyak V. I., Haponenko O. I., Ohienko M. M., Kulik V. P. (2020b) Engineering man-

agement of tillage equipment with concave disk spring shanks. *INMATEH. Agricultural Engineering*. 60(1). pp. 45-52. <https://doi.org/10.35633/inmateh-60-05>.

Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. (2019) Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*. 18. pp. 291-298. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N451>.

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*. 22(1). pp. 105-125. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0010>.

Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Wardal W.J., Shvo-

rov S., Dvornyk Y., Sivak I., Drahnev S., Derevjanko D. (2022a) Study of methane fermentation of cattle manure in the mesophilic regime with the addition of crude glycerine. *Energies*. 15(9). pp. 3439. <https://doi.org/10.3390/en15093439>.

Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Shvorov S., Roman K., Solomka O., Tarasenko S., Didur V., Biletskii V. (2022b) Study of technological process of fermentation of molasses vinasse in biogas plants. *Processes*. 10. pp. 2011. <https://doi.org/10.3390/pr10102011>.

Voinalovych O., Aniskevych L., Motrich M., Titova L. (2020) Rationale of acceptable risk of using tractors with operational damages of responsible parts. *Engineering for Rural Development*. 19. pp. 784-792.

UDC 631.4.001

MODELING OF PROCESSES OF BIOGAS OUTPUT PROCESSES OF DAILY VOLUME OF SUBSTRATE LOADING WITH ITS GRADUAL SUPPLY

Valiev T.,

<https://orcid.org/0000-0003-3400-6147>, e-mail: timurvaliev@gmail.com

Polishchuk V., Doctor of Technical Sciences, Professor,

<https://orcid.org/0000-0002-9654-9051>, e-mail: polishchuk@nubip.edu.ua

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Summary

Purpose of the study. *The purpose of the work is to experimentally establish the influence of the daily amount of substrate loading on the output of biogas during its gradual supply. The practical result will be the formation of a model of technical control of the output of biogas of the daily volume of loading of the substrate during its gradual supply.*

Research methods. *The methodological basis of the work is the generalization and analysis of known scientific results regarding the modern organization of biogas production of the daily volume of substrate loading during its gradual supply. Analytical method and comparative analysis were used to form a scientific problem, determine the goal and set research objectives. When creating empirical models, the main provisions of gas theory, system engineering, block diagrams of the algorithm for the distribution of production operations were used.*

The results of the study. *The article considered the tabulated data of the weight of the substrate and its individual components during daily loading of the methane tank. The results of the study of biogas yield with gradual loading of the substrate allowed us to state that fermentation is accompanied*

by two peaks of maximum biogas yield. The author graphically presented the effective dependence of the average yield of biogas with gradual feeding of the substrate on the fate of the changed substrate. A discussion was held regarding the calculated predicted values of the average yield of biogas during the fermentation of cattle manure with the addition of 3% glycerol by mass of manure. Generalized comparisons of the main indicators of a biogas plant with a methane tank with a volume of 10 m³ are also presented, depending on the daily output of biogas per unit mass of the substrate.

Conclusions. As a result of the conducted research, new scientifically based technical and technological solutions and mathematical models were obtained, which are aimed at increasing the efficiency of biogas production of the daily volume of substrate loading during its gradual supply. As a result of the performed analysis of the research object, it is substantiated that the gradual supply of the substrate to the methane tank provides a larger volume and more uniform output of biogas over time in comparison with periodic supply. With a one-time daily change of the substrate to 20%, the yield of biogas increases to 13.8 l/(kg day), while the heat of combustion of biogas is 25 MJ/m³. An increase in the one-time daily change of the substrate to 30% increases the output of biogas to 19.8 MJ/m³, however, due to the increase in the content of carbon dioxide in it, the heat of combustion decreases to 12–13 MJ/m³. In the case of a 50% change in the substrate, methane fermentation stops due to the washing out of the mother culture of methane-forming bacteria.

Key words: biogas, methane tank, cosubstrate, gradual loading, crude glycerol, biogas reactor.